

《論 文》

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

小 出 良 幸

要 旨

層状チャートには、さまざまな成因が古くから提唱されてきた。これらの成因の中から、可能性の高いものを選定していく方法を考え実施した。その結果、生物大絶滅説と生物大発生説、タービダイト流説が残った。成因ごとに層状チャートの構成岩石の堆積様式が異なってくるので、時間記録の様式に関する記録媒体、記録期間、記録速度などをモデル化してシミュレーションをして検討をおこない特徴と差異をまとめた。

キーワード：層状チャート，成因，モデル化，時間記録

I はじめに

著者は、地層に残されている時間記録を読み取る研究をこれまで進めてきた（小出，2006）。正常堆積による地層は非常に単調な時間記録の様式を持っている。一方、鳥弧を特徴づけるタービダイト層や付加体固有の層状チャートへの時間記録様式は、正常堆積物とは異なっていることは指摘されてきた（小出，2012;2013）。地層に記録されている時間記録の解釈に関する研究として、タービダイト層については小出（2014）でまとめた。また、層状チャートについても多くの検討を重ねてきた。層状チャートの成因に関してもっとも有力な仮説による記録様式を小出（2015）で考察した。有力な仮説とは、本論文では「生物大絶滅説」と呼ぶものである。この説は、深海底で非常にゆっくりと珪質殻や粘土が堆積している定常期間が、生物の大絶滅が起こると珪質殻の供給が停止し粘土だけが堆積する環境に変化する。定常期間と大絶滅期間の堆積相の変化によって、層状構造が形成されるという考えである。

主流となっている仮説以外にもいくつかの仮説があり、近年においても新たなデータに基づく新規の仮説が提唱されている。陸域に分布する地質時代の層状チャートは深海底堆積物であるという仮説が、どこまで根拠に基づいているかを小出（2016）で検討した。主流の仮説にもまだ未解決の部分があり、その弱点を他の仮説では説明できるなど、仮説ごとに一長一短があること

がわかってきた。

小出(2017)では、層状チャートの多様な成因に関して、多様性を生じる要因を整理し、それぞれの仮説における証拠の有無や可能性の程度を検討していった。主流の仮説以外にも、根拠が示されている仮説も存在していた。それらの仮説も否定されているわけではないため、対等な仮説として検討していくべきであると考えられる。

本論文では、層状チャートの成因に関わる要因へのアプローチの方法論を整理し、可能性の大きい仮説を選定していく。次に、選定した仮説で堆積作用のモデルを設定して、時間記録の様式を考察していく。

本研究は、2017年度札幌学院大学の研究促進奨励金(B・個人)「成因の違いによる層状チャートにおける時間の記録様式のモデル化と検証」(SGU-BS2017-01)の支援を受けた成果である。

II 層状チャートの特徴

本論文で対象とする層状チャートの特徴をまとめ、深海底堆積物とどのような成因関係があるのか、そして成因に関する課題をまとめていく。

1 層状チャートとは

チャートとは、二酸化珪酸(シリカ, SiO_2)の含有量が90wt% (重量比率)以上のものをいい、それ以下のものは「珪質+岩石名」と呼ばれる。チャートは、主には細粒の石英(quartz)とクリストバライト(cristobalite)を主構成物とし、非晶質二酸化珪素や方解石(calcite)、または霞石(nepheline)などを含むこともある。石英の結晶は陸から由来し、非晶質二酸化珪酸は生体構成物に由来したものが多い。

チャートには、産状や成因によって、付加体中に産する成層構造をもつチャート(層状チャートと呼ばれる)、炭酸塩岩(チョーク)中の団塊(ノジュール)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)。前者の層状チャートと後者2つは、産状においての違いが明瞭なので区別できる。大陸地域(島弧から由来したものは除く)に見られるチャートは団塊状チャートで浅海の大陸棚で形成されたもので、蒸発性のチャートは熱水湖や高塩分濃度の湖水で沈積や蒸発・乾固してできたので、それぞれ固有の産状を持っている。一方、日本列島ように付加体を主とした地質体で構成される島弧には、層状チャートが多いことが知られている(Pettijohn, 1975)。島弧の層状チャートは、海洋地殻形成後、深海底で形成された珪質軟泥が固化し、プレートテクトニクスによって付加体したものだとは一般には考えられている(小出, 2016)。本論文では、このような層状チャートを対象とする。

層状チャートには、チャートの中に粘土岩の薄い層が挟在されている。チャート層と粘土層の繰り返し成層構造となり、層状チャートの産状を特徴づけている。このような層状チャートの

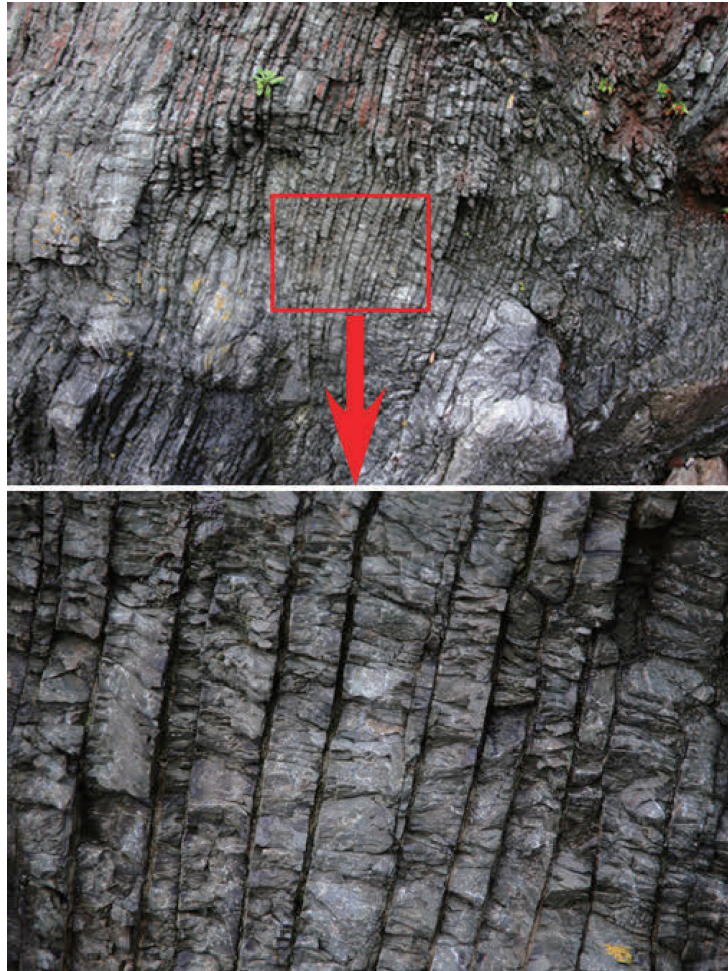


図1 層状チャートの産状

高知県土佐市宇佐町竜。横浪メランジュ中の層状チャートのブロック。上図:整然と成層している層状チャート。チャート相が優勢だが、右下にはスランプ(層内褶曲)、右上部には赤色頁岩に富んだ部分、左には層厚の大きなチャート層などの変化が見られる。四角で囲った部分を拡大したものが下図。下図:典型的な層状チャートの部分。チャート部が侵食に耐えて残り、粘土部が侵食されてくぼんでいる。

産状にも、さまざまな多様性があることは後述するが、本論文で扱う層状チャートの一般的な産状としては、厚いチャート岩に細粒の粘土岩(頁岩)の薄層が挟在されていることが繰り返えず岩相とする(図1)。

2 層状チャートと深海底堆積物の関係

まず深海底堆積物の特徴をまとめていく。遠洋域の深海底の堆積量は極端に少なく、その構成は生物遺骸と陸源物質に大別できる。生物遺骸は生物源堆積物(biogenic sediment)と呼ばれ、

珪質軟泥 (siliceous ooze) と石灰質軟泥 (calcareous ooze) が主となり、陸源物質は遠洋性粘土 (pelagic clay) と呼ばれる。

生物の遺骸や排泄物の有機物成分は、海中を沈降していく途中や堆積後の海底で、ほとんどが分解される (平, 2004)。分解されにくい珪質物質や石灰質物質のみが、海洋底の堆積物として残る。石灰質軟泥は、有孔虫 (foraminifera) が多く、翼足類 (pteropod) から由来するものもあり、熱帯から亜熱帯まで分布、深海堆積物で占める割合は重量で30%以上、全海底面積の約47wt%を占めると見積もられている (Vinogradov, 1967)。珪質軟泥は、放射虫 (radiolaria) と珪藻 (diatom) が多く、珪質海綿 (siliceous sponge) などを含む (服部, 2008)。珪藻軟泥は南極大陸をとりまく地域、北半球では北部太平洋のみの狭い範囲に分布し、放射虫軟泥は高緯度にも分布がみられるが、主には赤道付近の湧昇流が形成される場に分布する。遠洋性粘土は、風や海流などによる陸源の微粒子に由来し、粘土鉱物を主とし、石英、長石、方解石、岩石片や重鉱物を含み (青木, 2002)、堆積量は少量だがその分布範囲は広い。

層状チャートの形成場が深海底だと一般に考えられているが、その根拠として現在の深海底堆積物との類似性が挙げられている。

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が大きな特徴である。そこから以下のような根拠がでてくる。層状チャートの長い堆積期間 (5000万年~1億年) にわたって陸源碎屑物が堆積していない。通常の堆積物の碎屑性堆積物と比べて、堆積速度 (数 mm/1000年) が著しく遅い。そのような堆積場は遠洋域の深海底堆積物以外には知られていない。例えばプレート拡大速度 (数~数10 cm/年) からすると1000km四方の堆積場が必要である。環太平洋域全域の中生代付加体には層状チャートがみられるが、そこには広い堆積場 (大洋底) が想定される。さらに層状チャートから推定されている異常に遅い堆積速度が深海底のものと同じであることは、共通した形成メカニズムがあることを示唆している。

他にも成因関係を支持する重要な事実として、現在の海洋底に層状チャートの素材となる珪質軟泥が堆積していることである。また、陸上で見つかる地質時代の層状チャートには、微化石が含まれており、化石の種類や組み合わせが、深海底でたまった珪質堆積物の種構成や生育環境などが、現世の海棲の浮遊性や底生プランクトンに類似していることがわかっている (井本・斎藤, 1974; 斎藤, 1986)。上述したがチャートの構成鉱物は、生物体に由来するオパールから形成されていることも根拠となりうる。

これら多くの類似性や根拠から、地質時代の層状チャートは、深海底起源が広く認められるようになってきた (例えば、井本・斎藤, 1974; Price, 1977; 斎藤, 1986; Matsuda and Isozaki, 1991 など)。

層状チャートの特徴を、小出 (2016) は、

- ・多くの地域、時代に形成された層状チャートだが似た産状を持つ
- ・陸起源の碎屑物は極端に少ない

- ・ 陸由来物質の粘土の由来経路は気や海洋の循環による
- ・ チャートも粘土も堆積速度は陸周辺の碎屑性堆積物に比べ数桁に遅い
- ・ 層の形成は後成的な続成作用でなく初生的に形成された

とまとめた。ここでは断定的な記述をしたが、必ずしも証明されていないものも含まれ、未確定な部分があることには注意が必要である。

層状チャートと深海底堆積物は類似していることは確かだが、必ずしも深海底堆積物であることを決定づける証拠はないが、否定する証拠もない、のが現状である。

3 層状チャートの成因における課題

深海底堆積物は珪質軟泥と石灰質軟泥、遠洋性粘土からなることは上述したが、陸上の層状チャートには石灰質軟泥は認められない。陸地に定置するまでに、石灰質軟泥が何らかの原因でなくなっていることになる。その原因として、炭酸塩は海洋域では炭酸塩補償深度 (carbonate compensation depth, CCDと略される) があり、深海には石灰成分が溶解する条件の存在が考えられる。現在の深海底は、CCDより深いところが多いため、長い時間経過によって付加する前には石灰質軟泥が溶けていたと考えられる。小出 (2015) では、石灰成分が選択的に溶解する条件が深海底にあるため、層状チャートの構成物にならなかったとした。

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。

層構造の特徴としては、

- ・ 層境界は粘土層からなる
- ・ 粘土層は薄くチャート層は厚い
- ・ 各層の幅は一定ではないが繰り返されている

が挙げられる (小出, 2016)。

境界は、細粒の粘土からなる。一般に、粘土層は薄くチャート層は厚い。ただし、連続する層状チャートにおいても、粘土層の厚さが、非常に薄い (ほとんど見えない) 場合 (図2A) から、層として存在が認識できる厚さの場合 (図2B) まで多様性がある。さらに、チャート層と粘土層の量比は、チャートが多い (優勢) 互層から、粘土岩とチャートが等量の互層 (図2C)、粘土岩が多くチャートの量が少ない互層まで、いろいろな量比の層状チャート (互層) が知られている。層状チャートは、チャート優勢の互層を指すことが多い。チャート優勢の互層という似た産状でありながら、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。

なお、本稿でモデル化などの対象とする層状チャートは、チャートが優勢で粘土が少ないもの (図2A ~ B) を、その典型として扱うことにする。

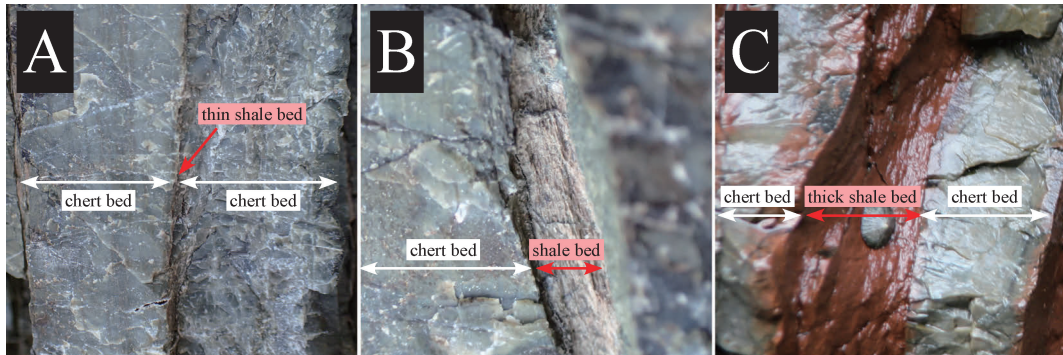


図2 層状チャートの粘土層の違い

高知県土佐市宇佐町竜。横浪メランジュ中の層状チャート。同一ブロック内で見られる層状チャートのチャート部と粘土層の比較。スケールは統一されていない。A：非常に薄い粘土岩（頁岩）しかない境界。B：チャートの方が優勢だが明瞭な粘土岩（頁岩）を挟んでいる。C：チャート部と赤色頁岩が等量の互層部。

Ⅲ 層状チャートの成因

層状チャートの主流の成因は、繰り返される生物大絶滅説であるが、他にもいくつもの成因が古くからあり、近年でも新仮説が提唱されている。それらの成因について、どのようなアプローチで進めるかをまず考え、次にそのアプローチからどの成因が信頼性が高いかを検討していく。そして最終的にモデル化を行うべき成因を選定していく。

1 成因へのアプローチの方法論

層状チャートの産状にはいくつかのタイプが存在し、その中には明らかに異なった成因に由来する特徴を持つものもあることを根拠に、いくつもの成因が唱えられてきた。現状では層状チャートは成因が確立しているわけではなく、いくつかの仮説が並立している状況といえる（小出，2017）。

層状チャートの産状からの成因は、詳細な堆積構造の観察に基づいて提唱されたものである。ただし、すべての層状チャートで、産状から成因が読み取られているわけではない。その困難さは、層状チャートの岩相に由来する。粘土岩は、細粒であり薄層が多いため、堆積構造が識別しにくい。また、チャートの材料である珪質遺骸も、細粒で似たサイズと同質物からなるため堆積構造が形成されにくいというえに、続成作用によるシリカの再結晶で元の堆積構造が消えてしまっていることが多い。層状チャートでは、このような堆積作用や続成作用が起こっているため、層構造の成因がなかなか確定できない事態が起こっていると考えられる。

成因への別の視点として、化学的特徴から堆積環境を区分しようという試みがある。例えば、Murray (1994) において、もっとも分解能がよかったのは、希土類元素 (rare earth elements, REE と略される) のランタノイド (lanthanides) La_n/Ce_n (層状チャートの組成を粘

土の濃度で規格化した値)であった。だが、論文で示されたデータ数が少なく、深海底チャートの領域が広がり、他の領域と重複しており、区分の精度はよくない。このように化学組成による方法でも成因を決定するに至っていない。

層状チャートの多様な成因のどれに、どの程度の信頼性があるかを、2つのアプローチで考えていくことにする。ひとつは網羅的分類からのアプローチで、もうひとつは要素還元主義的アプローチである。網羅的分類からのアプローチとは、これまで唱えられてきたすべての成因をもれなく分類し、どれが棄却でき、どれが可能性が高いかを検討していくものである。一方、要素還元主義的アプローチとは、成因に関係するすべての要因を抽出し、その要因の中から根拠や信頼性のあるものを選択していく方法である。検討の結果、可能性のあるとされた成因はすべて対等に扱っていくことにする。

2 網羅的分類からのアプローチ

成因の網羅的分類は、先行研究をもとに進めていく。層状チャートの成因論を区分する試みはすでになされている。代表的なものとして、McBride and Folk (1979) や Hori et al. (1993) などの区分がある。McBride and Folk (1979) は、層状チャートの成因を

MF-a 続成作用

MF-b 生物生産の変動:粘土の定常堆積

MF-c 珪質殻の急激な供給:粘土の定常堆積

MF-d 粘土の急激な供給:珪質殻の定常堆積

の4つに分類した(記号は著者が便宜的に付けた)。この分類では、異地性の再堆積は考えていないところが課題である。「生物生産の変動:粘土の定常堆積」とは、上で述べた小出(2015; 2016)でも採用した、現在多くの研究者が層形成の成因としているものである。

一方、Hori et al. (1993) では、

HO-a 続成作用

HO-b1 SCDによる摂動:粘土および珪質殻の定常堆積

HO-b2 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

HO-c1 珪質殻の急激な堆積:粘土の定常堆積で

HO-c2 タービダイト流による珪質殻の再堆積:粘土の定常堆積

HO-d1 粘土の急激な堆積:珪質殻の定常堆積

HO-d2 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(記号は著者が便宜的に付けた)。この7つには、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。

2つの分類から、現在、8つの層形成の成因論が提唱されていることになる。層状チャートの成因論の網羅的分類を整理すると表1のようになる。

表1 層状チャートの成因論の網羅的分類

| 成因 Model No. | 内容 | 信頼性 | 文献 |
|----------------------------|----------------------------------|-----|--------------|
| 初生 | | | |
| 現地性 | | | |
| P1 | 珪質殻の供給停止 (今までの主力説) | ○ | MF-b |
| P2 | 珪質殻の急激な供給 | ○ | MF-c ; HO-c1 |
| | SCDによる摂動 | × | HO-b1 |
| | 粘土の急激な堆積 | × | MF-d ; HO-d1 |
| 異地性 (再堆積) : タービダイト流 | | | |
| R1 | タービダイト流 (珪質軟泥と粘土を含む) →分級による分離 | ○ | HO-b2 |
| R2 | 珪質軟泥タービダイト流 | ○ | HO-c2 |
| R3 | 粘土タービダイト流 | ○ | HO-d2 |
| 後成 | | | |
| 続成作用 | | × | MF-a ; HO-a |

層状チャートの成因に関わる要因。初生と後成に大別して示した。初生は現地性と異地性(再堆積)に区分。現地性は4つの仮説がある。異地性は「タービダイト流」によるもので、通常のタービダイト流によるものだけでなく、深海底の底層流などの何らかの流れによって堆積作用を生じたものの総称とした。MFは小出(2015; 2016)で示したMcBride and Folk (1979)の区分番号、HOは同じくHori et al. (1993)の分類番号。

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。分離説とは、珪質軟泥と粘土の混在していたものが、続成作用でシリカが分離し粘土質物質が残余としてできるというものである(Murray et al., 1992)。一連の層状チャートにおいて、すべての層内で同様の作用が同程度に進行するという条件は解明されておらず、証拠となる事例もない。現在では支持されていない。

置換説は、他の化学成分がシリカ(SiO₂)によって置き換えられたというものである(服部, 2008)。石灰質軟泥堆積場での層状チャートの形成や珪質および石灰質両者の混在する堆積場での層状チャートの形成を説明する説で、石灰質がシリカで置換されたとするものである。層状チャートでは石灰質部の欠損を説明できる。チャート団塊や珪化木などの形成は、続成作用において起こることは知られている。しかし、珪化作用が、深海底のすべての石灰質軟泥でおこっているという証拠はなく、石灰質軟泥が置換されてきた層状チャートと珪質軟泥がそのまま固化してできた層状チャートに、何らかの違いが生じるはずだが、陸上の層状チャートには、そのような違いは認められないことから信頼性が足りないといえる。

以上のことから、続成作用は棄却することにした。網羅的分類からは、7つの成因論が可能性として挙げられ、初生的成因を検討していくことになる。

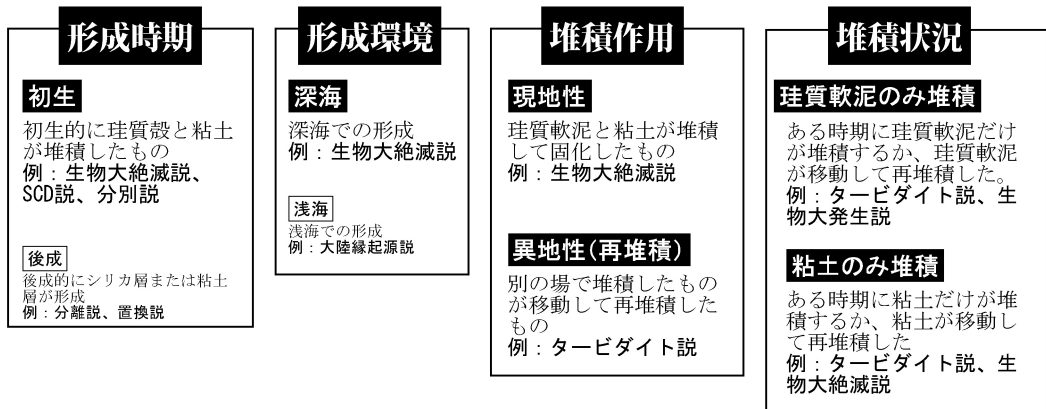


図3 層状チャートの成因に関わる要因

層状チャートの成因に関わる要因として、形成時期、形成環境、堆積作用、堆積状況に区分し、それぞれの説の要因を示した。可能性として残った要因は黒背景で白抜き文字で示した。要因の例となる仮説も示した。

3 要素還元主義的アプローチ

次に、要素還元主義的アプローチでみていく。成因に関わるすべての要因を抽出し、それらの要因ごとに根拠や信頼性を検討していくことにする。

小出(2017)では層状チャートの成因から要因の抽出をしており、「形成時期」として初生的か後成的か、「形成環境」が浅海か深海か、「堆積作用」として現地性堆積か再堆積か、「堆積状況」として珪質殻のみが堆積しているのか粘土だけなのか、に分類した(図3)。これらの要因の組み合わせにより、多くの成因が可能となるが、すべての成因に基づいたチャートが認定されているわけではなく、現在では棄却されている成因もある。

小出(2017)では、それぞれの成因に関する根拠や信頼性も検討してきた。成因に関する要因のうち、層状チャートの「形成時期」では「初生説」を、「形成環境(形成場)」としては「深海」に限定されることを示した。「堆積作用」と「堆積状況」の決着はみていない。これらの要因の組み合わせによっていくつかの成因が考えられる。

「現地性」の「堆積作用」としては、「珪質殻のみ」か、「粘土のみ」か、いずれかが堆積することで層構造が形成されるとするものである。珪質殻のみが堆積するためには、珪質殻の急激な堆積が必要になる。このような現象は、珪質殻をもった生物のみ、あるいは海棲のプランクトン全体が大発生するような場合である。一方、「粘土のみ」が堆積する現象では、陸源の粘土の急激に増える現象は考えにくく、珪質殻の供給が停止することで「粘土のみ」が堆積し層を構成することになる。

「異地性(再堆積)」の「堆積作用」は、「深海底」での何らかの流れにより、他の地域に堆積していた珪質軟泥と粘土が移動してきて、層状構造を形成するという考えである。深海底での流れには、タービダイト流、あるいは深海底の底層流などが考えられる。移動する物質は粘土なら

細粒なので、量が少なければ弱い流れでも移動可能となる。量が多くなるには、それに見合った流量が必要になる。いずれにしても、別の場所に堆積したものが、深海底の流れによって移動して再堆積したとする成因である。タービダイト流とは、本来は堆積物の重力流として、斜面を流れる密度流によって形成されるものを指す(小出, 2014)。本稿では典型的なタービダイト流だけでなく、異地性の堆積物を形成するなんらかの流れを「タービダイト流」と呼ぶことにする。したがって、「異地性(再堆積)」の「堆積作用」とは、珪質殻だけ、粘土だけ、あるいは両者が混在したものが、「タービダイト流」によって別の堆積場に再堆積することである。両者が混在しているもの場合は、再堆積時に形質軟泥部と粘土が分離することになる。

以上の要素還元的なアプローチから、「深海」で「初生」の成因として、「堆積作用」としては、「現地性」と「異地性(再堆積)」の両方の可能性があり、「堆積状況」としては、「珪質殻のみ」の堆積か、「粘土のみ」の堆積が可能性として残ることになる。

4 成因論の選定

上記で検討してきたいくつかの成因をまとめ、時間記録の様式を検討するためのモデルを選定していく(図4)。

まず、初期条件を整理しておく。ここでいう初期条件とは、定常状態としての堆積環境の設定である。現地性であれば深海を、再堆積であれば素材の起源と堆積条件を限定しておくことである。

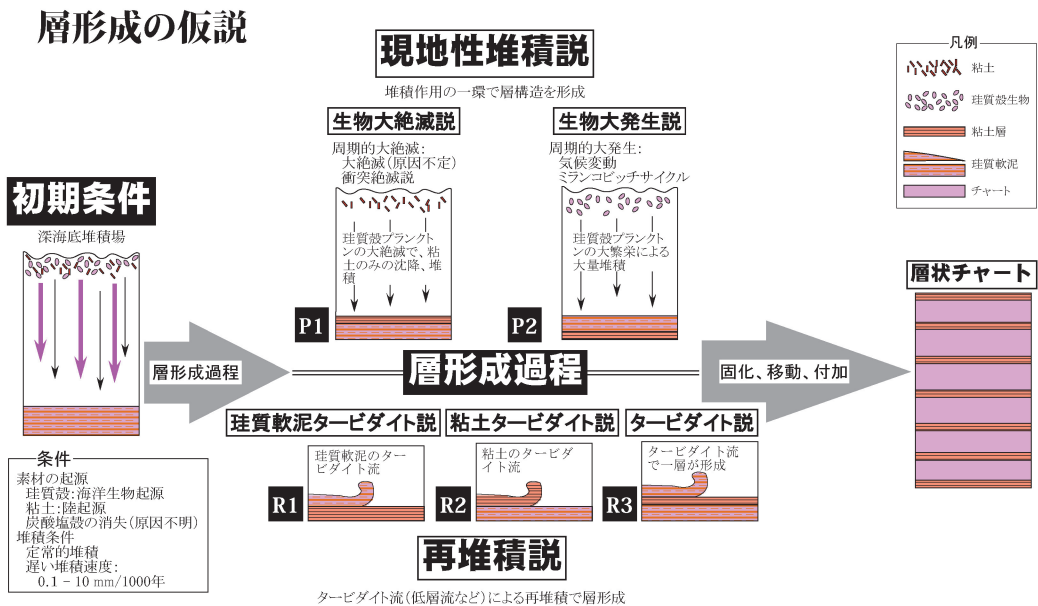


図4 層形成の仮説選定

層状チャートの層形成として可能性のあるモデルと初期条件。P1, P2, R1, R2, R3は、表1で示したモデル番号に対応。

表2 深海底堆積物, 層状チャートの堆積速度

| Sediments | speed (mm/1000year) |
|---------------------------------------|---------------------|
| Ocean Floor Sediments (Recent) | |
| siliceous ooze | 1~10 |
| pelagic clay | 0.2~15 |
| Geological Age | |
| bedded chert | 0.3~30 |
| Normal Sediments | |
| terrestrial mud | 50~2000 |

これまで得られている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, 現在の正常堆積物の堆積速度の範囲を示した。値は小出 (2015, 2016) のコンパイルより。

層状チャートの素材となる物質は, 定常的な深海底での堆積場が設定される。素材の珪質殻(珪質軟泥)は海洋に生息するプランクトンが起源で, 粘土は遠くにある大陸から海流は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と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, 碎屑性堆積物 (20~2000 mm/1000年) と比べて定常的な堆積速度は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, 深海粘土は0.2~15 mm/1000年となり (小出, 2017), 非常に遅いものである (表2)。ただし堆積速度には, ある程度の幅があるので, 成因によっては堆積速度として桁が違うというモデルを考えることも可能となる。

同時期に堆積していたかもしれない炭酸塩殻の成分は, 層状チャートでは消失している。その原因はまだ確定されていない。また成因論としても論じられていないので, 残念ながらモデルでは, 組み込まないことにする。

初期条件には, 層を形成する機構は組み込まれていないので, 層形成の要因を成因として考慮しなければならない。これが成因論の多様性を生んでいることになる。層構造形成において成因論の多様性を生む要因について検討する (図4)。層構造形成する成因として, 大きく現地性堆積説と再堆積説 (異地性) の2つに分けた。

現地性堆積説では, 網羅的分類で示した「SCDによる摂動」(Hori et al. (1993) ではHO-b1としたもの)の仮説は, 海洋にはSCD (珪酸塩補償深度) が存在し, シリカの溶解度が大きい深度や環境があるため, 珪質殻だけが選択的に溶けるという作用を成因とするものである。SCDで溶解度が最小の深度は水深1.5km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)。ただし溶解度は小さく, 堆積速度が勝っていると考えられる。別の条件が加わることで層形成につながる可能性はあるが, 「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)。したがって, 「SCDによる摂動」の可能性は小さいと考えられ, モデル検討

の対象からはずすことにする。

現地性堆積説の「粘土の急激な堆積」(McBride and Folk (1979) ではMF-d, Hori et al. (1993) ではHO-d1としたもの)は、粘土の由来を限定しないが、粘土の堆積速度だけが急増加するという考えである。秩父帯の瀬戸川テレーンの層状チャートでは、化学組成の検討から粘土層の堆積が速いという推定(Matsumoto and Iijima, 1982)もあるが、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、十分な説得力を持たない。また、他の層状チャートへの敷衍も困難である。

したがって、現地性堆積説として、「珪質殻の供給停止(表1 P1)」(MF-b, 今までの主力説)と「珪質殻の急激な供給(表1 P2)」(MF-c;HO-c1)が残ることになる。「珪質殻の供給停止」としたものは、提唱されている現象としては生物の大絶滅によると考えられるので、「生物大絶滅説(図4 P1)」と呼ぶことにする。「珪質殻の急激な供給」は、珪質殻が大量に形成される状態として生物の大発生が考えられるので、「生物大発生説」と呼ぶことにする。

異地性(再堆積)としては、移動するものには、「珪質軟泥だけ(図4 R2)」(HO-c2), 「粘土だけ(図4 R3)」(HO-d2), 「両者が混在したもの(図4 R1)」(HO-b2)が考えられた。「両者が混在したもの(図4 R1)」では、タービダイト流によって再堆積する時に分級し、珪質殻層と粘土層が新たに堆積構造として形成され、層構造全体が再堆積によってできたと考えるものである。再堆積説では、それぞれを「形質軟泥タービダイト説(図4 R1)」, 「粘土タービダイト説(図4 R1)」, 「タービダイト説(図4 R1)」と呼ぶことにし、モデルとして検討することになる。

5 モデルの概要

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

(i) 生物大絶滅説:P1

生物大絶滅説は、生物が大絶滅を起こすことによって層状チャートが形成されたというものである。小出(2015:2016)でも採用したが、現状では有力な説である。

生物大絶滅説が唱えられるようになったのは、深海底の珪質軟泥で生物相に大きな年代ギャップが見つかってきたことによる(例えば, Edwards, 1973;Borch, 1978;Hori et al., 1993など)。年代ギャップが存在する位置は、薄い粘土層を挟在していたり、時には粘土層もないことがある。有意な年代ギャップ(化石による年代測定で検出できるほど)があるのに、堆積物がない現象を、ハイエイトス(hiatus, 無堆積と訳されることもある)と呼び、境界部で下位層の削剥を伴うような場合をラキユナ(lacuna)と呼ぶ。ハイエイトスの存在は、その間珪質殻をもったプランクトンが不在であったことを示す。大きな海洋であったはずの場が、珪質殻をもつ生物種だけが

選択的に不在になったとは考えにくいので、その時期に大絶滅が起こったと推定されることになる。生物大絶滅によって層が形成されたとするのが生物大絶滅説である。シナリオは次のようになる。

海洋では浮遊性プランクトンの珪酸塩質と炭酸塩質の殻、および陸源の粘土が深海底に堆積し、それぞれ珪質軟泥と石灰質軟泥、深海底粘土の素材となる。海表層で生産される珪質・石灰質物質のほんの一部しか堆積物にならず、数mmのチャート層の形に数千年も要する。粘土物質は、陸域の物質や火山噴火物が、風や海流によって、少量ながら定常的に深海底に供給されている。粘土の堆積量は珪質物質に比べて微量であるため、定常的にはチャートのみが堆積しているとみなされる。ただし深海底は安定した堆積場なので、長期にわたって堆積作用が継続でき、地層を形成できる堆積量となると考えられる。このようなシナリオによって、深海底の定常状態（日常）で堆積作用が起こるとしている。

深海底はSCD（珪酸塩補償深度）以深、CCD（炭酸塩補償深度）以深となり、珪質物質も石灰質物質も溶融する条件になっているが、珪質物質の堆積量が溶解度に勝るが、石灰質物質では溶解度が勝っていることから、深海底では石灰質軟泥が溶融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。

稀な事件として生物大絶滅が起こると、生物生産が停止し珪質殻の供給もストップすることになる。生物絶滅の間中は粘土だけが堆積する。やがて生物相が回復してくると珪質層の形成が再開され、通常の珪質物質優勢の堆積がおこる。このような大絶滅の事件が繰り返されて粘土層が形成され、層状チャートとなる。粘土層の厚さは絶滅の期間に、チャート層は通常の生物が繁栄している期間を示していることになる。

このような生物大絶滅説が、層状チャートの成因論として支持されてきた。小出（2016）では、大絶滅が繰り返し起こるといふ現在の主流派の仮説で層状チャートの特徴を概観し、小出（2015）においては、この大絶滅説に基づいて層状チャートの時間の記録形態をモデル化していった。

生物の大絶滅は、我々の日常感覚からすると稀な事件がだ、地球の歴史という時間スケールで考えると頻繁に起こっている現象と考えられる。その規模と頻度も、大規模な絶滅数は少なく、小さいものは多数起こっている、というスケーリング則が知られている（Raup, 1979; Sepkoski, 1984）。ところが、大絶滅の原因が特定されているものは多くない。地球規模の環境変化や大陸配置、隕石衝突などいろいろな原因が挙げられてきたが、一つの原因ですべての大絶滅が説明できるわけではない。

大絶滅の原因がわかっているものとして、K-Pg境界（かつてはK-T境界と呼ばれた）の事件がある。隕石の衝突により大絶滅が起こったことは、多くの研究者の統一見解となっている（後藤、2011）。隕石の大きさが推定され、落下地点も特定され、絶滅のプロセスの解明に重点が移っている。

また近年、三畳紀後期（2億1500万年前）においても隕石の衝突の証拠が、日本の犬山地域

坂祝 (さかほぎ) の層状チャートから見つかった (Kuroda et al., 2010)。層状チャート中の粘土層の白金族の異常な濃集と Os 同位体の負の異常から、この時代にも隕石による絶滅が起こったことが示されている (Onoue, et al., 2012;2016;Sato et al., 2013;2016)。さらに、大分県津久見の秩父帯の三畳紀中期 (2億4000万年前) の層状チャートからも宇宙塵が多数発見され (Onoue et al., 2009;2011), 衝突の可能性が指摘されている。ただし、これらの時代の大絶滅の事件は世界各地で見つまっているわけではない。

大絶滅が隕石衝突が原因として証明されているものもあるが、隕石衝突が層状チャートのすべての成因とするまでには至っていない。しかし、上記のような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、衝突絶滅説である。

(ii) 生物大発生説:P2

生物大発生説とは、ある時期に海洋でプランクトンが大発生して珪質殻を大量に堆積するという仮説である。

生物大発生の現象として、季節ごとにプランクトンが大発生して生じる年縞構造が形成されることが知られている。カリフォルニア湾では、春先にプランクトンの大発生している時に白いシリカバンドができ、秋から冬の生物活動の低下している時に黒いバンドが形成され、1年に1つの層 (bipartite) が年縞となっていく (Thunell et al., 1995)。だが、このような季節の周期性による生物の大発生は、時間スケールが層状チャートの堆積速度とは異なり、このモデルは適用できない。

生物を大発生に導いた条件が長期間におよび、大きな海洋で地球規模で起こるような現象でチャート層ができるという仮説が、生物大発生説である。例えば、長期におよぶ気候変動、エルニーニョよりもっと大規模な海洋循環の変動など、稀な現象ではあるが生物大発生を起こす要因も考えられる。

層状チャートから鉄隕石起源の小さい隕石粒 (宇宙塵と呼ばれる) が、多数発見されることがある。Hori et al. (1993) は、宇宙塵の落下量を化学組成から見積もる方法を提案した。その方法を用いて、下部ジュラ紀の粘土層の堆積速度は $0.018 \text{ g/cm}^2 \cdot 1000 \text{ 年}$ 、チャート層は $1.9 \text{ g/cm}^2 \cdot 1000 \text{ 年}$ となり、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る。また、化石年代から、一組のチャートと粘土の堆積期間は、上部ジュラ紀の低緯度の堆積場では 1 万 5000 年~2 万年 (平均 2 万 3000 年) で、下部ジュラ紀の高緯度の堆積場では 4 万年~4 万 5000 年 (平均 4 万 2000 年) と見積もった。2 万年や 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ことになる。

Ikedo et al. (2010) は、推定するチャート層の枚数に応じて、40 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) の周期を見出した。40 万年周期

は公転の離心率に、10万年は気候変動の周期に対応し、いずれもミランコビッチ・サイクルで説明可能だとした。

Hori et al. (1993) や Ikeda et al. (2010) の検討から、稀な現象でも地球史的な時間スケールで繰り返される事件であれば、層状チャートが形成されることになる。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し、生物の大発生へという因果関係が生じて、生物大発生説の周期性が起こる可能性がある。生物大発生説もモデルとして検討する。

(iii) タービダイト流説:R1, R2, R3

タービダイト流説とは、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) により、別の地域の堆積物が移動して再堆積することである。よく見られる碎屑性堆積物の例としては、タービダイト層がある。タービダイト流による再堆積物は、堆積学では正常堆積物になるが、再定置堆積物として区別されている (日本地質学会地質基準委員会, 2001)。ただ本稿では、層状チャートを「初生」の産物と考えているので、タービダイト流による堆積物も検討していく。

一般に層状チャートのチャート内や粘土層内の堆積構造は不明瞭な場合も多いのだが、堆積構造が見られ、堆積機構が判明することもある。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が認められることもある。これは淘汰や級化をもつ堆積物で、タービダイト流による粗粒の珪質殻が先に堆積し、その後細粒の粘土が堆積したと推定される。

珪質軟泥のタービダイト流の例として、西南日本の丹波帯の層状チャートでは、堆積構造として底痕 (flute cast, groove cast) や化石が配列したラミナ (斜交ラミナや平行ラミナ, 定方位配列), 侵食 (cut-and-fill構造) などが認められる (井本ほか, 1974; 井本・福富, 1975)。これらは、珪質殻がタービダイト流として由来した根拠となりうるものである。他にも、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古第三紀の層状チャート (Hein et al., 1983), オーストラリア・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。

大陸棚付近で起こるタービダイト流の延長として、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。例としては、瀬戸川帯の層状チャートには化学組成から推定した堆積速度が粘土がより5倍大きいと見積もられ、粘土層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) などが報告されている。

以上のことから、タービダイト流による層状チャートの形成の可能性にも、地質学的、地球化

学的根拠が示されていることになる。ただし、タービダイト流という駆動力は同じであっても、運ばれる物質の違いによって、珪質軟泥タービダイト流説 (R1) か、粘土タービダイト流説 (R2) か、あるいは両者の混合物のタービダイト流説 (R3) か、に分けられる。混合物のタービダイト流説では、堆積場で珪質殻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。

タービダイト流説では、3つの説を検討する。

IV 仮説による時間記録の様式の違い

限定してきた5つの仮説をもとにモデル化をおこない、層状チャートにどのように時間が記録されているのか、それぞれのシミュレーションから記録様式を検討していく。

1 時間記録の様式とは

いずれのモデルにおいても、定常的な堆積時期と、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。両時期で、どれくらいの期間で、何（堆積する物質）が、どのような速さ（堆積速度）で堆積しているかが、時間記録にとって大きな要因となる。それぞれのモデルでは、実際の層状チャートの産状（図1や図2）と、実際の堆積物から推定されている堆積速度（表2）をもとに、その値を定めていき（表3）、モデルを設定して、数値計算をもとにして記録様式を検討していくことにする。

モデルの堆積速度は、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た。すべてのモデルにおいて定常期間として数万年オーダーの堆積期間をとった。た

表3 成因モデルの堆積条件

| Model | ordinary time | | | extinction or explosion time | | |
|------------------------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------------|--------------|-----------------|
| | 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 | | | turbidite time | | |
| タービダイト流 (R1) (珪質軟泥と粘土を含む) | 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 |

定常時期 (ordinary time) とそれ以外の事件時期 (extinction, explosion time, turbidite time) で、期間 (time span) と岩石ごと (chert, clay) の堆積速度を示した。値は、層状チャートの産状から推定した桁数を示している。

だし、タービダイト流に関してはタービダイト流の特徴、および層形成のメカニズムから、流れが収まると堆積も終わるはずなので、堆積期間は数日を想定した。

生物大発生説と生物大絶滅説のモデルでは、定常期間も事件時期も粘土の堆積速度は一定にして、珪質物質（図表ではchertと表記）の堆積速度は層状チャートの産状から設定した。タービダイト説では、定常期間には堆積速度は小さくし、タービダイト時には急速に堆積するモデルにした。

このように仮説ごとでモデルを設定して、堆積作用が起こった時、時間とともにどのような堆積物形成されるかをシミュレーションしていく。そして堆積物という物質に、時間がどのように記録されているのか、あるいは記録されないのか、を検討することになる。検討に当たって、2種類のグラフ表記を用いて記録様式を見ていく。

一つは、時間経過（elapsed time）とともに堆積量を積算したグラフである。このグラフでは、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、事件での堆積速度を示している。

もうひとつは、時間経過によるそれぞれの時期（定常期間と事件期間）で、何がどの程度の堆積したのかを示したグラフである。このグラフでは、総堆積量のグラフと同様に区切られているが、柱の高さが各堆積物の堆積量を示しており、柱の幅が記録の期間を示している。したがって、短時間の現象では、たとえ堆積量が多くなっていても、その時間記録が少なく、広がりが大きければ時間記録は多くなる。しかし、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ことになる。

2 モデルごとの時間記録

モデルに基いてシミュレーションをし、堆積状況ととしてグラフ化して、各モデルの時間記録の特徴を検討していく。

(i) 生物大絶滅説モデル

生物大絶滅説は、原因が未定だったり、あるいは隕石の衝突によるものも考えられているが、いずれであっても大絶滅期間には粘土が堆積し、定常期間に珪質物質（図ではchertの表記）が堆積することになる。

堆積速度は、定常期間では粘土の堆積速度が遅く（0.1 mm/1000year）、珪質物質が速く（10 mm/1000year）なる。なぜなら、層状チャートの産状から考えると、この期間の堆積物が珪質物質が主となり、チャートへとなくなっていくからである。モデルでは、定常期間では2桁の差があるとした。絶滅期間には、珪質物質の供給が停止するので粘土だけが堆積する（図5）。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、時間の記録は、チャート層に定常的な時間記録が残されていることになる。

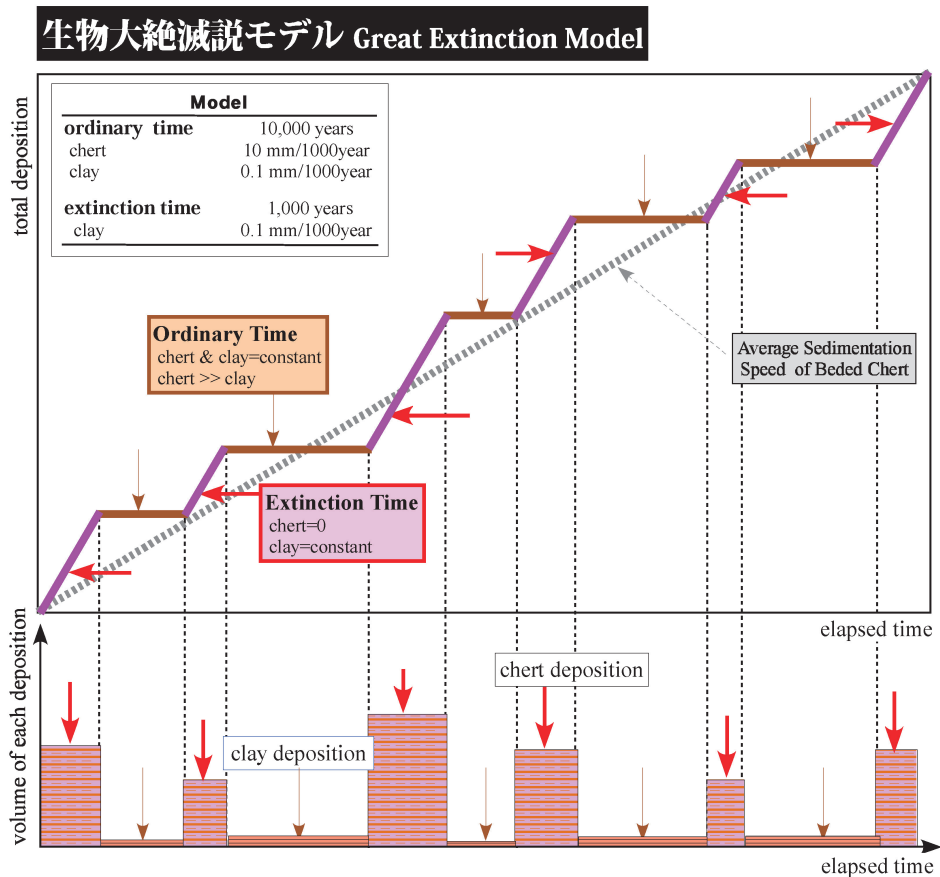


図5 生物大絶滅説モデル

生物大絶滅説によるモデルとその堆積作用。量比はスケールに依存せず定性的で、現実の層状チャートの産状に合わせて示した。上図：時間経過 (elapsed time) にともなって積算堆積量 (total deposition) の変化を示した。上に挿入した表はモデル計算に用いた値 (表3を参照)。灰色点線で示したものは層状チャートで得られるはずの平均的堆積速度を示したもの。下図：上図の堆積モデルで堆積した時、各時期に堆積した相とその堆積量を定性的に図化したもの。

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、粘土層には、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。

(ii) 生物大発生説モデル

生物大発生説は、生物が大発生する期間に珪質物質が短期間に堆積し、それ以外の定常時期には主に粘土が堆積することになる。

モデルでは、定常期間の粘土の堆積速度 (10 mm/1000year) は、珪質物質 (0.1 mm/1000year) より2桁ほど速く設定した。また、大発生期間を1000年のオーダーにし、珪質

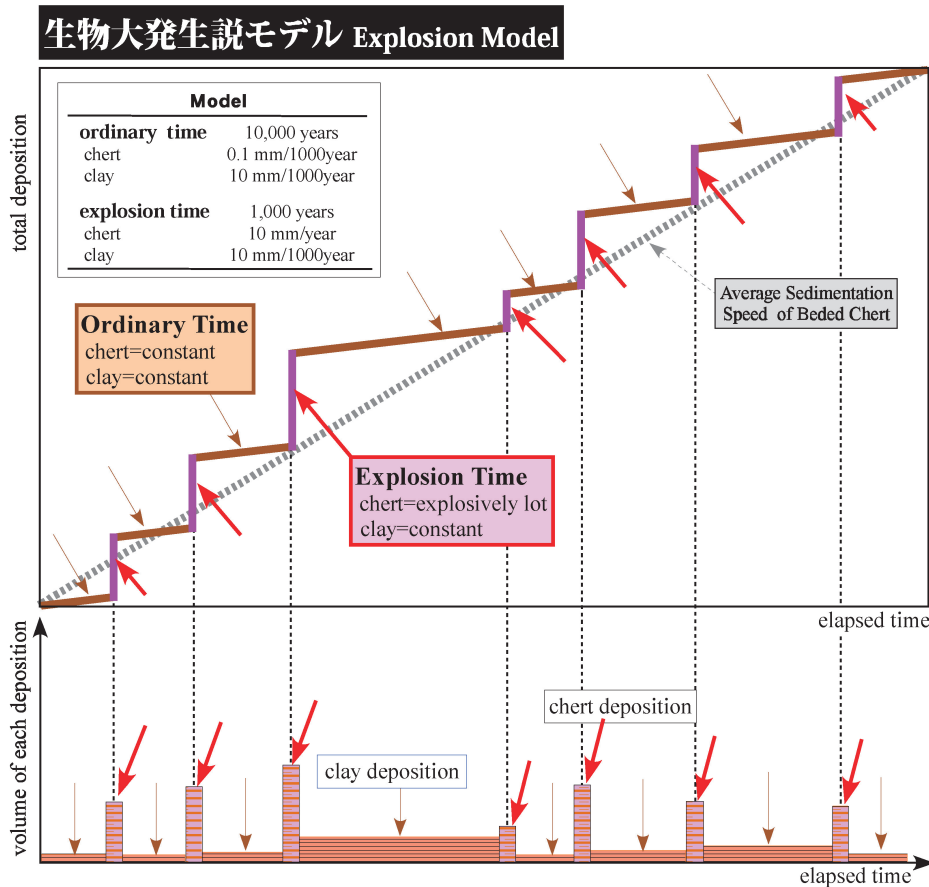


図6 生物大発生説モデル

生物大絶滅説によるモデルとその堆積作用。図の見方は図5を参照。

物質の堆積速度は、期間内で層状チャートの産状に見合った堆積量をえるために、10 mm/yearとした。ただし生物の大発生の期間の推定が変わるのであれば、珪質物質の堆積速度も変わってくることになる。

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。地質情報の解読は、非常に困難だと予想される。

(iii) タービダイト流説モデル

タービダイト流説では、堆積作用が非常に少ない堆積場に、タービダイト流によって層状チャートの素材の珪質軟泥と粘土の混合物が流れてくるというものである。構成物の堆積場については限定していない。

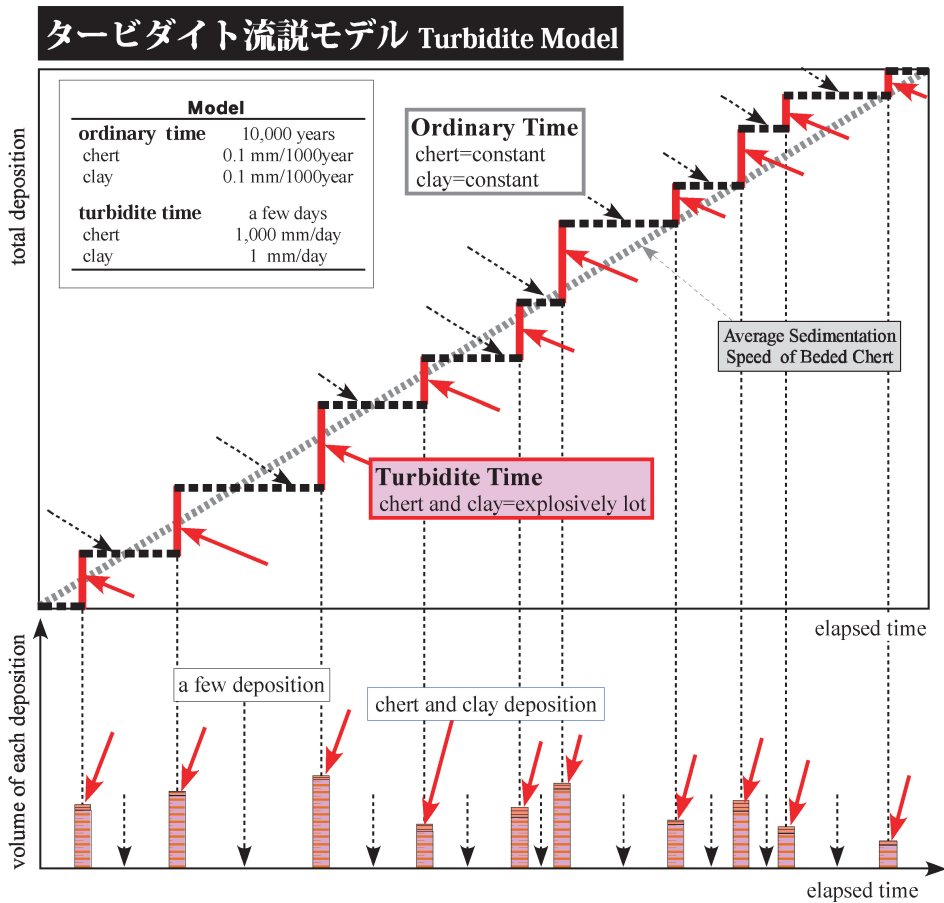


図7 タービダイト流説モデル

生物大発生説によるモデルとその堆積作用。図の見方は図5を参照。黒の破線は定常期間の堆積量はほとんど無視できる量であることを意味する。

タービダイト流説モデルでは、タービダイト流の流入は数万年に1度の頻度で起こり、流入期間は数日程度とした。短期間に分級作用が起こり、層構造が形成されることになる(図7)。堆積場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、定常時期が長い堆積物がなく、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である。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通常の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っている。

(iv) 珪質軟泥タービダイト流説モデル

珪質軟泥タービダイト流説は、粘土だけが堆積している堆積場に、タービダイト流により珪質軟泥が流れ込んでくることになる。この説でも、両堆積場の地形的位置や流れについてのメカニズムなどについては考慮していない。

このモデルでは、堆積場には堆積速度の遅い (0.1 mm/1000year) 粘土だけが堆積しており、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 (図8)。その堆積期間は数日で、堆積速度は層状チャートの産状から1000 mm/day程度とした。

チャート層には時間の記録は数日分しかない。しかし、上記のタービダイト流説モデルでは定常期間の記録は残されていなかったが、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いく、解読は困難であろう。

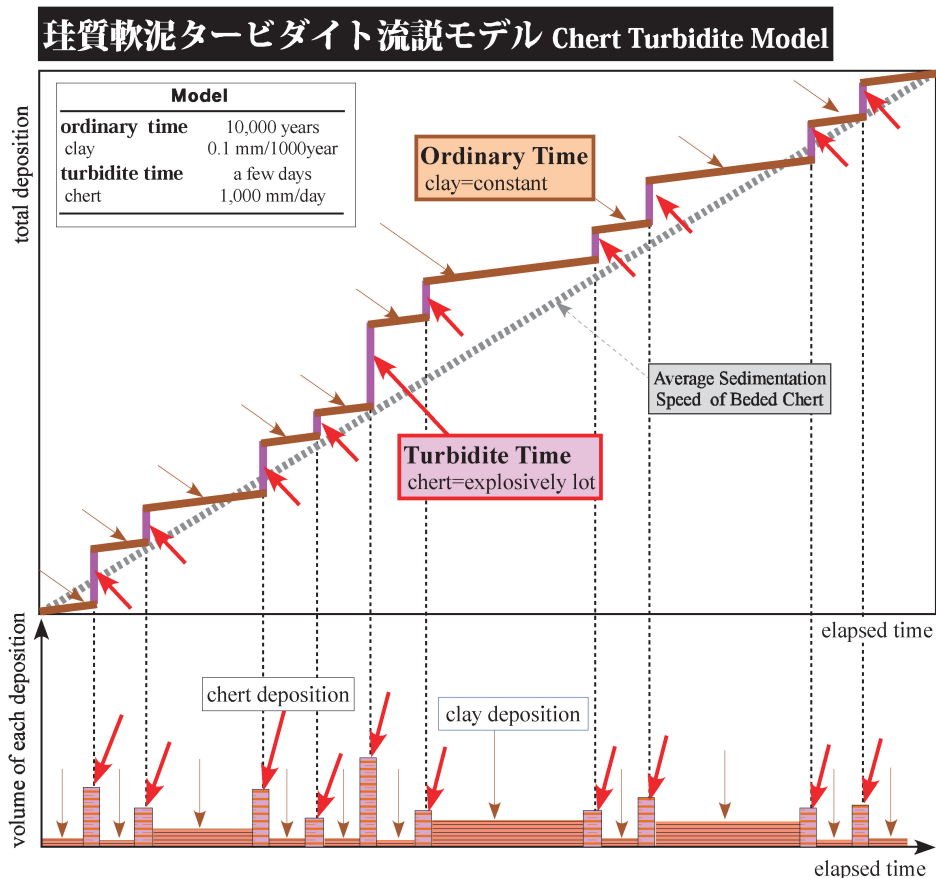


図8 珪質軟泥タービダイト流説モデル

珪質軟泥タービダイト流によるモデルとその堆積作用。図の見方は図5を参照。

(v) 粘土タービダイト流説モデル

粘土タービダイト流説は、珪質殻だけが堆積している場に、タービダイト流により粘土が流れ込んでくることになる。この説も、両堆積場や流れなどに関しては限定していない。

粘土のタービダイト流は、数万年に一度の頻度で起こり、その堆積速度は通常の粘土のもの(0.1 mm/1000year)より大きい、層状チャートに見られる粘土層がチャート層に比べて一桁小さいことから、イベントごとの堆積量も一桁小さくなり、珪質軟泥タービダイト流説モデルの珪質軟泥より3桁小さいもの(1 mm/day)とした。

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。

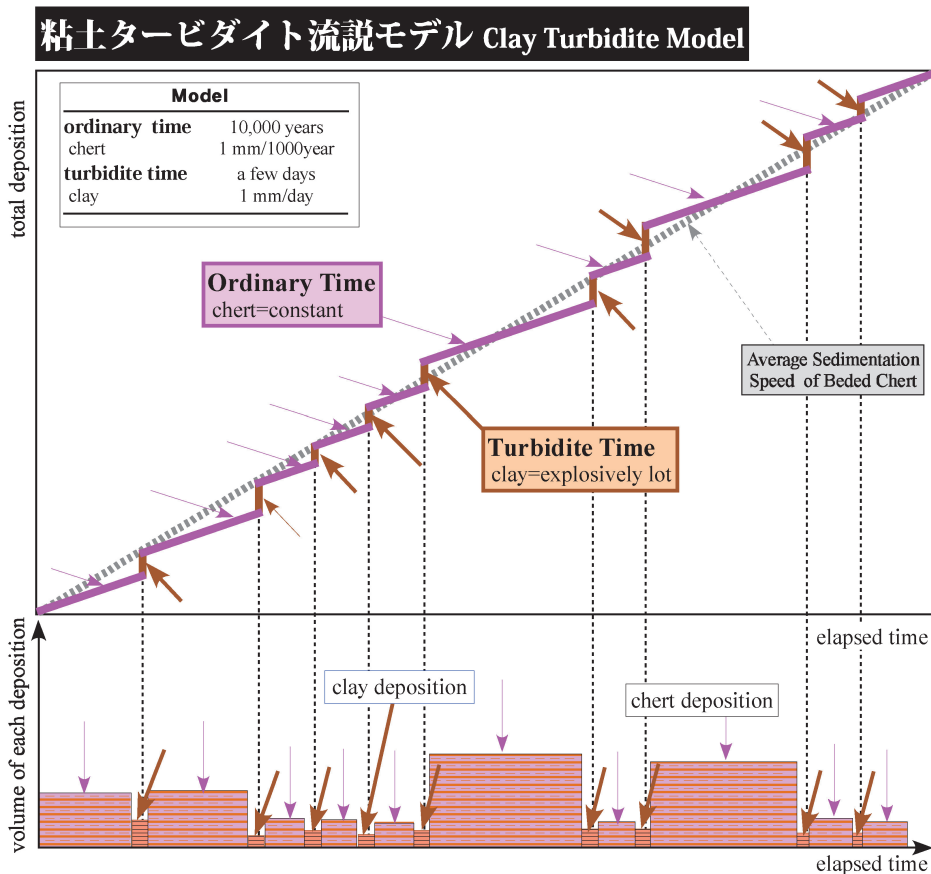


図9 粘土タービダイト流説モデル

粘土タービダイト流によるモデルとその堆積作用。図の見方は図5を参照。

3 時間記録様式と期間

グラフによって、それぞれのモデルごとの時間記録の様式の特徴を示してきた。以下では、モデルの特徴を比較しながら時間記録の違いを検討していく。

まとめるにあたって、記録媒体 (recording media) とその記録期間 (recording span), そして記録速度 (recording speed) を定義しておく。記録媒体とは、時間が記録されている物質としては、層状チャートを対象としているので、珪質殻, 珪質軟泥, チャート, 深海底粘土, 粘土岩がその素材となる。本論文では過去の地質時代の記録を読み取ることが主な目的となるので、記録媒体としてチャート (chertと表記) と粘土岩 (clayと表記) になる。両岩石に記録されている時間だけが読み取られていくことになる。記録期間とは、各モデルでそれぞれの記録媒体が、堆積が継続している期間となる。記録速度とは、堆積期間にどれほどの堆積速度で堆積しているかを意味するもので、ここでは単位層厚 (mm) 当たりどれくらいの時間が記録されているかを目安とする。ただし、チャートと粘土岩が同時堆積している時でも、産状からはどちらかの岩石しか認識できないので、見えている岩石の値を示すことにする。また、モデルの数値は、桁数を推定しているものである。

各モデルから記録媒体, 記録期間, そして記録速度を推定したものを, 表4に示した。

生物大絶滅説モデル (P1) では、チャート (1万年) は粘土岩 (1千年) に比べて一桁長い記録期間がある。だが、記憶媒体に大きな層厚差 (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。その速度は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 (1千年) に速い速度 (0.1 year/mm) で堆積するので、時間記録のほとんどは粘土岩 (1万年) に、ゆっくりとした速度 (100 year/mm) で記録される。

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) は残されているが、それ以外の時間は、定常期間の堆積場での記録となる。

混合物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

表4 モデルごとの時間記録様式と期間

| recoroding media Model | chert | | clay | |
|---------------------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | recording speed | time span | recording speed | time span |
| 生物大絶滅説 (P1) | 100 year/mm | 10,000 years | 10,000 year/mm | 1,000 years |
| 生物大発生説 (P2) | 0.1 year/mm | 1,000 years | 100 year/mm | 10,000 years |
| タービダイト流説 (R1) | few | a few days | 1 day/mm | a few days |
| 珪質軟泥タービダイト流説 (R2) | few | a few days | 10,000 year/mm | 10,000 years |
| 粘土タービダイト流説 (R3) | 1,000 year/mm | 10,000 years | 1 day/mm | a few days |

5つの仮説でモデル化したものから導かれる記録媒体 (chert, clay) とモデル (P1, P2, R1, R2, R3) での記録速度 (recording speed) と記録期間 (time span) を示したものの。

構となるので、ほとんどの時間記録は層間に消えていることになる。

珪質軟泥タービダイト流説モデル (R2) では、チャートは短期間の記録しか残されていない。粘土岩には長期間 (1 万年) の記録が、ゆっくりとした堆積速度 (10,000 year/mm) で、少量の媒体に残されている。

粘土タービダイト流説モデル (R3) では、少しの粘土岩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) の記録が、ゆっくりとした速度 (1,000 year/mm) で残されている。

以上の各モデルの時間記録の様式を見てきた。今後、これらのモデルは、層状チャートから読み取られていない情報を推定によって決めているので、これらの値を正確に求めていく必要がある。

V さいごに

本論文で、これまで層状チャートの成因とされているもののうち、可能性の大きいものが5つ選択されることを示した。5つの仮説でモデルを設定してシミュレーションから、時間情報が物質 (記録媒体) に、どのように記録されているのかを検討してきた。その結果、モデルごとに、記憶媒体の記録様式 (記録時間, 記録速度) には違いがあることを半定量に示してきた。今後、各モデルの推定値を精度を上げていくことも必要だが、モデルごとに記録媒体で記録期間と記録速度の関係を定式化していくという作業が残っている。定式化に関しては、稿を改めて報告する予定である。

しかしなにより重要なことは、層状チャートの成因を明らかにしていくことである。その後、チャートや粘土岩に残された時間記録の解読方法の開発、高精度化をしていくことになる。さらに、時間経過にもなって起こる「変化」を、岩石学的、地球化学的に読み取る手法の開発が必要になる (例えば、山本, 1991 など)。チャートと粘土岩という岩石学的に全く異なった物質に対して両方で同等の精度をもった解読は、かなりの困難が伴うであろうが、チャレンジすべき課題である。

層状チャートは、深海底の穏やかな環境で、長期に渡って堆積と、繰り返される事件によって層が形成され、記録となっている。そこには地球の事件や時間記録とともに、いろいろな時代の環境情報も保存されているはずである。その記録を読み取る技術はまだ不完全であるが、もし読み取られたならば、地球環境の変遷や地球史の事件の解読において、非常に重要な情報を提供することになっていくであろう。そんな期待が持てる素材である。ただし、このような研究は多くの地質学者の参加と、いろいろな視点をもった学際的な取り組みとが必要であろう。

文 献

青木三郎, 2002. 「海底堆積物中の粘土鉱物 近海及び遠洋堆積物を例として」『粘土科学』4, 2, 97-102.

- Barrett, T. J., 1982. Stratigraphy and sedimentology of Jurassic bedded chert overlying ophiolites in the North Apennines, Italy. *Sedimentology*, 29, 353-373.
- Borch, B., 1978. Synthesis of deep-sea drilling results in the Indian Ocean. Elsevier, *Oceanography Ser.* 21, 174 p.
- Edwards A. R., 1973. Southwest Pacific regional unconformities encountered during Leg 21. *Init. Rep. DSDP*, 12, 641-692.
- 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.
- 堀利栄・樋口靖・藤木徹, 2000. 「付加体層状チャート—化学組成からのアプローチ—」『地質学論集』55, 43-59.
- 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, 2006. 「物質, 時間, 空間の視点からみた地質学的境界」『札幌学院大学人文学会紀要』80, 21-41.
- 小出良幸, 2012. 「島弧—海溝系における付加体の地質学的位置づけと構成について」『札幌学院大学人文学会紀要』札幌学院大学総合研究所, 92, 1-23.
- 小出良幸, 2013. 「島弧における付加体の形成と擾乱について」『札幌学院大学人文学会紀要』札幌学院大学総合研究所, 93, 37-58.
- 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.
- 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.

- Kuroda, J., Hori, R. S., Suzuki, K., Grocke, D. R. and Ohkouchi, N., 2010. Marine osmium isotope record across the Triassic-Jurassic boundary from a Pacific pelagic site. *Geology*, 38, 12, 1095-1098.
- 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.
- Murray, R. W. (1994). Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications. *Sedimentary Geology*, 90, 3, 213-232.
- Murray, R. W., Jones, D. L. and Buchholtz ten Brink, M. R., 1992. Diagenetic formation of bedded chert: evidence from chemistry of the chert-shale couplet. *Geology*, 20, 271-274.
- 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.
- 日本地質学会地質基準委員会編, 2001. 『地質基準』 共立出版, 180 p.
- 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.
- Raup, D. M., 1979. Size of Permo-Triassic bottleneck and its evolutionary implications. *Science*, 206, 217-218.
- 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.
- Sepkoski, J. J., 1984. A kinetic model of Phanerozoic taxonomic diversity. III. Post-Paleozoic families and mass extinctions. *Paleobiology*, 10, 246-267.
- 平朝彦, 2004. 『地質学2地層の解説』 岩波書店, 441 p.
- Thunell, R. C., Tappa, E. and Anderson, D. M., 1995. Sediment fluxes and varve formation in Santa Barbara Basin, offshore California. *Geology*, 23, 1083-1086.
- Vinogradov, A. P., 1967. *Introduction to Geochemistry of the Ocean*. Nauka, Moscow, 213 p.
- Vecsci, 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.
- 山本綱志, 1991. 「珪質堆積岩の主要・微量元素組成ならびにその堆積環境」『地球化学』25, 17-26.

Study of Time Recording Styles of the Models
based on Various Origins of Bedded Cherts

KOIDE Yoshiyuki

Abstract

Various origin hypotheses were advocated to bedded chert. Some hypotheses with a high possibility were selected from them. As a result, mass extinction, explosion and turbidite hypotheses have been left. The sedimentation styles of selected hypotheses were modeled. The author discusses the characteristics and differences of recording media, time span, recording speed of these models.

Keywords : bedded chert, origin, sedimentation styles, modeling, time recording style

(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)