第 18 回講義　　2025 年 10 月 25 日

地層の縞模様から読み解く

地球環境史

千葉大学名誉教授　伊藤 慎

■本日のメニュー

皆さまこんにちは、本日は宜しくお願いいたします。皆さまは地層が露出した崖（露頭）を見られたことがおありかと思います。露頭を構成する岩石は、その成因から、堆積岩、火成岩、変成岩の 3 種に大きく分類されます。本日は、堆積岩に注目して、地層の縞模様のなかには長い地球の歴史のいろいろな痕跡が残っている、というお話をさせて頂こうと思います。

岩相層序の基本単位は「層 (formation)」地質図に表現できる厚さと広がりが必要

ここに示す写真は、米国ユタ州南西端にある Zion 国立公園の露頭です。ここには堆積岩で構成される地層が厚く発達しています。例えば、この地層には斜めの縞模様が見られます。このような縞模様は堆積構造と呼ばれ、礫、砂、泥の粒子が堆積した当時の流れの特徴が記録されています。また、崖の状況を見ていただきますと、出っ張っている部分は主に砂岩、へこんでいる部分や斜面がなだらかな部分は主に泥岩で構成されています。このような泥岩や砂岩の厚さの変化で示される縞模様や堆積構造の特徴が、地球環境とどのように関わっているのかについて、また、今回の講演依頼でご要望頂いた、チバニアンの話とそれに関連する地磁気の逆転と地球環境史の関係についてのお話も、地磁気は私の専門分野ではありませんが、最後にご紹介させて頂こうと思います。

この写真の Zion 国立公園で観察される地層は、今からおよそ 2 億 1 千万年前から 1 億 8 千万年前にかけて堆積した地層です。これらの地層が形成された期間にも、地磁気は何回も逆転を繰り返しています。この繰り返しは，白黒の「地磁気の縞模様」として表現されています（黒は現在と同じ向きの地球磁場、白は地球磁場の南北が反転した時期を示す）。

本日のお話の主な内容ですが、

- 岩相と堆積環境：「岩相」とは地層の岩質（地層の構成物）を示すもので，例えば，地層を構成する礫岩，砂岩，泥岩の厚さの割合などに相当します。岩相は、地層が堆積した堆積環境（主に水中、場合によっては陸上）の特徴が大きく反映されています。はじめに、岩相と堆積環境の関係について，その概要を簡単にお話しさせて頂きます。
- 堆積環境と地層の縞模様：次に、1）河川などで見られる上流から下流への一方向の水流のなかで堆積した地層にはどんな堆積構造（縞模様）が形成されるのか、2）浅い海底付近で波の作用で発生する振動する水流の影響下で堆積した地層の堆積構造の特徴や、嵐に伴う暴浪によって海底付近で発生する複合流の下で形成される堆積構造の特徴、さらに、3）深海底で堆積した地層を特徴づける堆積構造などについて、お話しさせて頂きます。養老渓谷の地層は深海底で形成された地層の良い例の一つで、砂岩と泥岩の繰り返しが特徴です。堆積当時の水深は 500 m から 1000 m 程度であることから、深海底にも大量の土砂が運搬され堆積したことが理解できま

す。このような土砂を運搬したメカニズムや、そのメカニズムと地球環境の変化との関わりについてもお話させて頂きます。

- 地磁気の逆転：最後に、地磁気の逆転と地球環境の関わり等についてお話しさせて頂きます。

■Zion 国立公園の地層

Zion 国立公園の地層の写真に戻りますと、ある地層は主に砂岩から、ある地層は厚い泥岩の一部に砂岩が挟在し、またある地層は厚い砂岩に薄い泥岩が挟在した地層から構成されています。このように、岩相によって区分・命名された地層の積み重なりは､地質学用語で「岩相層序」と呼ばれます。この写真では、より上位の（すなわち堆積した時代がより新しい）地層から順に、岩相層序は以下の通りになります。

- ナバホ層：185-180 百万年前に堆積。
- カヤンタ層：195-185 百万年前に堆積。
- （スプリングデール砂岩部層：カヤンタ層の一部）
- モエナビ層：210-195 百万年前に堆積。

これらの地層が堆積した当時のこの場所（現在のユタ州すなわち北米の西部）の環境はどうであったのかを見てみましょう。

先ほど「岩相とは地層が何でできているか，その岩質を示す用語」とお話しました。より詳しくは、堆積岩における岩相は、粒径（粒子のサイズ）の大小から礫岩・砂岩・泥岩に大きく三区分され（礫・砂・泥がある程度の割合で混合する地層もあります）、さらにそれらの粒径が何 mm か、また，粒子の構成鉱物（粒はどのような鉱物でできているか）や粒子あるいは粒子間の充填物を構成する化学物質は何か、などによって異なります。これらの物理的・化学的特徴に加えて、堆積構造すなわち地層に見られる縞模様も、岩相を区分する大きな要素となります。

岩相の違いは、その地層が堆積した環境の違いを反映しています。この写真に示された Zion 国立公園で区分される 4 つの地層を例にとりますと、以下の通りになります。

- ナバホ層（185-180 百万年前）：崖が切り立っており、硬い砂岩でできています。高さが 10 m から 15 m にも及ぶ大きな斜めの縞模様（斜交層理という堆積構造）が積み重なっていることが特徴的で，この地層は砂漠で堆積したと解釈されています。すなわち，陸上で、砂の粒子が風によって運搬され堆積した砂岩です。この縞模様から、どの位の強風がどの向きから吹いていたのか、当時の気候の特徴を読み解くことができます。
- カヤンタ層（195-185 百万年前）：斜面がなだらかで、そのことからも判るように、風化に対して弱く脆い泥岩で主に構成されています。一部出っ張った部分が認められますが、そこは硬い砂岩でできています。この地層は河川で形成された地層で、砂岩の部分は蛇行する河川の流路で、泥岩部分は流路周辺の氾濫原（はんらんげん；流路から溢れ出た水が氾濫する湿地）で、それぞれ堆積したものです。
- スプリングデール砂岩部層：この地層はスプリングデールという町の近郊のみに露出する、砂岩の卓越した地層で、カヤンタ層の一部と解釈されています。この地層は，複数の流路とその間の砂礫州の発達で特徴付けられる「網状河川」で堆積したものです。流路が移動し，これに伴って砂礫州の位置が次々に変化することに伴い、砂や礫が次々に積み重なって形成されています。網状河川は、現在の関東地方の山あい（河川上流部）でもしばしば見られます。
- モエナビ層（210-195 百万年前）：カヤンタ層と同じく斜面がなだらかで、泥岩が卓越しています。砂岩はあまり含まれておらず、その岩相の特徴から、蛇行河川の主に氾濫原（湿地）で堆積した地層であることが判ります。

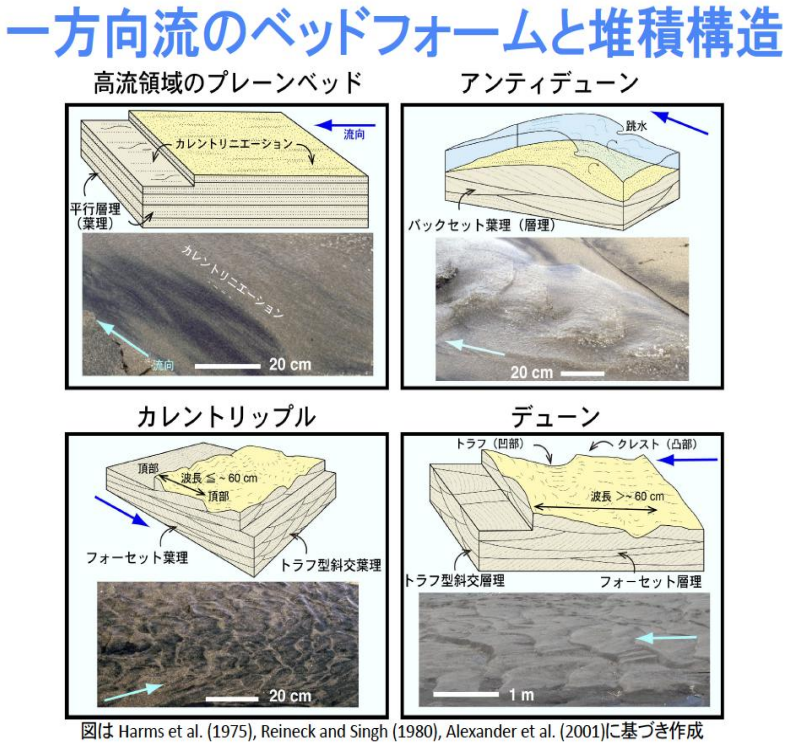
これら 4 つの地層の堆積した環境を俯瞰しますと、北米大陸のこの地域においては、モエナビ層とカヤンタ層（スプリングデール砂岩部層を含む）が堆積した 210 百万年前から 185 百万年前までの 2500 万年間は、気候が湿潤で、川が流れていたことが理解されます。しかし次のナバホ層が堆積した時代､すなわち 185 百万年前から 180 百万年前にかけては、気候が乾燥化し、砂丘や砂漠が発達

していたことが判ります。すなわち，ナバホ層の形成は，気候が急激に乾燥化したことを示すわけです。このように、地層の特徴を読み解くことによって、その地層が堆積した場所において、気候がどのように変動していったかを知ることができます。

Zion 国立公園の地層に見られた気候変動、すなわち川の流れる湿った気候から砂漠乾燥気候へ、という例は、現在の地球上でも見られます。例えば、中国の内モンゴル自治区東部（吉林省の省都長春の西方）には蛇行河川が流れており、この河川周辺域は湿っていて植生が豊かですが、この河川の北方は乾燥し砂漠化しています。

■一方向流で形成される縞模様

河川のような上流から下流への一方向の水流のなかで堆積した堆積岩は、どんな堆積構造（縞模様）で特徴づけられるのか、見てみましょう。下の写真は小さな川の川底の写真で、代表的な 4 つのベッドフォームと堆積構造の特徴が示されています。川底の凹凸模様は、地質学用語でベッドフォーム （Bedform）と呼ばれます。



図は Harms et al. (1975), Reineck and Singh (1980), Alexander et al. (2001)に基づき作成

川底の表面の形態からの分類：

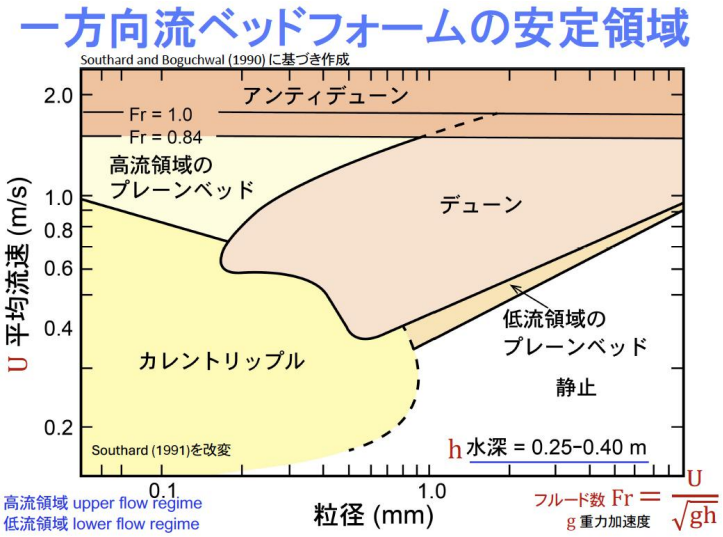
- 右下写真の川底は幅（波長）の大きな凹凸を示しており、デューン（Dune）と呼ばれるベッドフォームです。
- 左下写真の川底は波長がより小さな凹凸で、カレントリップル（Current ripple）と呼ばれます。
- 波長が 60 cm より大なら Dune、小なら Current ripple と一般には分類されます。
- 左上写真の川底は平らで、プレーンベッド（Plane bed） と呼ばれます。
- 右上写真では、川底の凹凸にほぼ対応して水面がうねっていますが，時々水面が砕けて上流側に粒子が運ばれます。このような凹凸は、Antidune と呼ばれます。

側面（断面）から見た縞模様の分類：

- Current ripple や Dune を水流に平行な断面で見ますと、縞模様は下流に傾いて（下流に向かって下がって）います。水流に直行する断面では、縞模様はお椀を伏せたような形を示します。
- Plane bed では、断面の縞模様は水流に平行、直交どちらの場合でも平らです。
- Antidune では、水流に平行な断面で見ますと縞模様は上流に向かって傾いて(下がって)います。

堆積構造の縞模様は「層理」あるいは「葉理」（厚さ 1 cm 以下の薄い層理）と呼ばれ、例えば「お椀を伏せたような形の縞模様」は「トラフ（Trough）型斜交層理・葉理」と呼ばれます。これらの地質学用語を皆さまに覚えていただく必要はありませんが、この講義で今後「---層理あるいは葉理」という用語を時々用いますので、これらの用語は縞模様のこと、とご認識頂ければと思います。

さて、断面の縞模様の傾きから、地層を形成した流れの方向が判りました。このほかに、縞模様の厚さから堆積場の水深を、堆積岩を構成する粒子のサイズ（粗さ細かさ）から水流の速度を、それぞれ推定し、それらの情報を組み合わせて堆積環境を復元することができます。したがって，地層に見られる縞模様は、昔の環境（古環境）の復元に役立つ情報を提供してくれるのです。

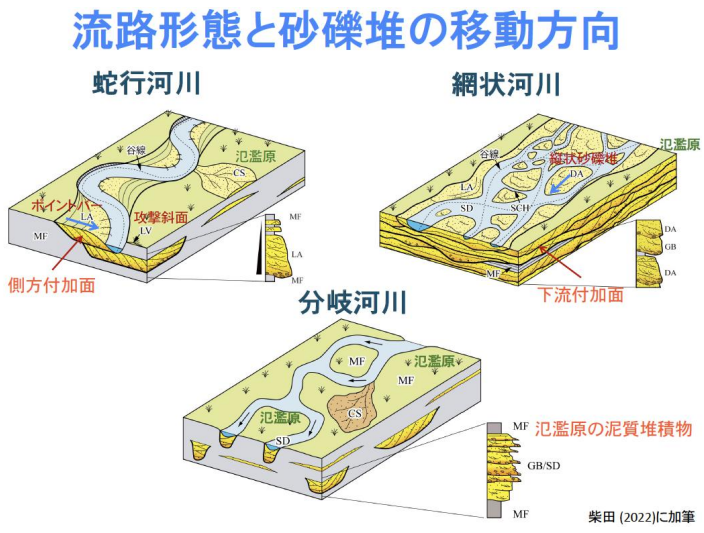


左に示す図は、先ほどお話ししました 4 種類のベッドフォームが形成される条件がまとめられた実験結果です。粒子の粒径（横軸）と一方向流の平均流速（縦軸）によって、ベッドフォームの形成条件が異なることがおわかり頂けると思います。ただし，この図は、右下に書かれた通り水深 25 cm から 40 cm の条件下における実験結果で、水深が変化すればそれに応じて 4 種類のベッドフォームが形成される条件が変化します。

この図で縦方向の変化に着目しますと、例えば粒径 0.5 mm の粒子の場合、流速がゼロから白色の範囲では粒子は静止していますが、流速が増大し，濃い黄色の領域に入ると粒子は移動を開始し、形成されるベッドフォーム（堆積構造）は流速に応じてカレントリップル → デューン → 高流速域のプレーンベッド → アンティデューン、と変化します。このように、同一の粒径でも流速が異なれば異なったベッドフォーム（堆積構造）が形成されます。

次に横軸方向の変化に着目しますと、例えば平均流速が毎秒 0.7 m の場合、粒径が約 0.2 mm 以下であればカレントリップルが形成され、0.2 mm を超えるとデューンが形成されます。

一方，この図の場合よりも水深が深くなった場合は、カレントリップルやデューンなどの 4 種類のベッドフォームが形成される境界領域が変化します。何れにしても、一方向流によってベッドフォーム（堆積構造）が形成されるにあたっては、平均流速、堆積粒子のサイズ、ならびに水深が大きな影響を及ぼします。



河川の流路形態と河川堆積物の岩相・堆積構造の関係について見てみましょう。左の図では、河川中下流域に多く見られる蛇行河川（図左上）、より上流域に見られる流路が複数ある網状河川（図右上）、湿地が広がる流域や河口付近で見られる分岐河川（図下）、が示されています。

- 蛇行河川においては、流路は多くの場合一本で、蛇行した屈曲部の内側ではあまり侵食が起きず、そこでは優先的に砂州が形成されます。この砂州は Point bar と呼ばれます。一方屈曲部の外側は内側に較べ水流による侵食を強く受けますので、堆積よりもむしろ侵食が行われ，周囲の氾濫原堆積物が削られます。
- 網状河川においては、多数の流路の間に、砂や礫が堆積した砂礫州の高まりが生じます。下流方向に延びた砂礫州は、地質学用語では縦状砂礫堆と呼ばれますが、この高まりが時の経過とともに下流や側方に移動し、それに応じて流路の位置も変化します。
- 分岐河川は、現在の日本ではあまり例が見られないのですが、インドネシアのカリマンタン島東部にあるマハカム Mahakam 川の河口、そこには広大なマハカムデルタという三角州が形成されており、このマハカムデルタ内に多数の分岐河川が見られます。蛇行河川と網状河川の中間型のような形態ですが、流路の中にある島には植物が繁茂し，氾濫原が発達していることから、

網状河川の砂礫州と比べると位置が比較的安定した州である（島が簡単に移動消失することは無い）、という点が蛇行河川や網状河川と異なります。

それぞれの河川に堆積する堆積岩はどんな岩相・縞模様を呈するのでしょうか。

- 蛇行河川の屈曲部内側にはPoint bar堆積物が形成され、外側は侵食され削られてゆきます。そのため時間の経過とともに、川の屈曲度合いは大きくなり、Point bar堆積物は内側からより外側に向かって側方に移動し積み重なってゆきます。このため、Point bar堆積物を流れに直交した断面で見ると、側方に積み重なった斜めの縞模様（側方付加面）を呈します。Point barの周辺のでは氾濫原で泥が堆積するので、Point bar堆積物の直上には氾濫原で堆積した薄い砂層を挟在する泥が重なることも蛇行河川堆積物の特徴になります。
- 網状河川においては、流路間に堆積した砂礫の高まりが時間経過とともに下流側に移動するので、流れに平行な断面で見た場合に、下流の向きに傾いた縞模様（下流付加面）が形成されます。また、網状河川においては礫と砂の移動と堆積が主体で、泥はあまり堆積しません。
- 分岐河川においては、氾濫原が卓越するので、流路に堆積する砂や礫のほかに、氾濫原に堆積する泥が厚く発達する特徴があります。

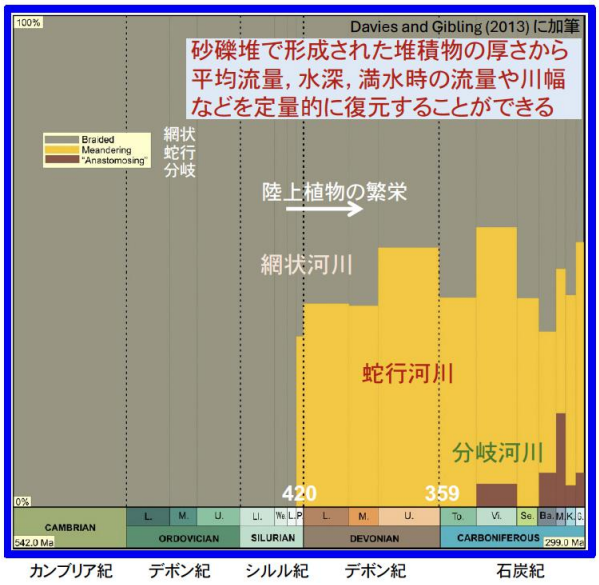
蛇行河川について更に詳しく見てみますと、蛇行部分の外側のほうが内側より流速が大きく、これに伴う遠心力で水面は外側のほうが高くなります。その結果、水圧の差を解消するために外側から内側に向かう2次的な水流が生じます。また、流路内では水深が深いほど流水による引きずりの力がより大きいため、より粗い砂や礫が運搬されPoint barの基底部に堆積します。また，水深がより深い箇所ではより大きなDuneが形成されるため，Point bar堆積物の下部ほど縞模様の波長がより大きくなることも判っています。このため、側方に積み重なって堆積したPoint bar堆積物を垂直方向に観察すると、下部ほど粒径が粗く縞模様（の波長）も長く、上部にゆくにつれて粒径も波長もより規模が小さくなり、最上部は氾濫原の泥でキャップされます。なお，Point bar堆積物の厚さは、川の満水時の水深とほぼ同じ値になります。

蛇行河川堆積物の例として、我孫子市の布佐に龍ヶ崎層（常総層）という、およそ10万年前に堆積した蛇行河川のPoint bar堆積物が露出しています。この露頭では、お椀を伏せたような縞模様（トラフ型斜交層理）が明瞭に見られ、それに直交する方向，すなわちこの露頭断面に直交した東方向に当時の川が流れていたことが判ります。Point bar堆積物は主に砂層で構成されていますが，この上位には泥質堆積物が重なり、その中に植物の根の化石が多く見られます。これは氾濫原で堆積した泥層です。砂層には左側（北側）に緩く傾いた縞模様（側方付加面）がしばしば見られ、Point barがこの露頭の右から左に向け移動していったことが判ります。

網状河川堆積物の例としては、ユタ州中央部東端のBook Cliffsの露頭（白亜紀のおよそ8千万年前の堆積岩が長さ150 km以上にわたって連続して露出する露頭で、地質学研究では有名な露頭）に見られるキャッスルゲート砂岩部層（タッシャーキャニオン渓谷で観察される上部の地層）があります。この地層で見られる縞模様は、流れに直交方向ではお皿を重ねたトラフ形斜交層理、流れに平行な方向では下流側に緩く傾いた縞模様（下流付加面）が観察されることから、網状河川堆積物の特徴を示します。この地層は大部分が砂岩から成り、我孫子市布佐の龍ケ崎層と較べて泥岩の挟在が少ないことも、網状河川堆積物の特徴を示しています。

以上、蛇行河川と網状河川の例を見てきました。次頁上段に示す図は、横軸に地質時代（542百万年前のカンブリア紀初めから299百万年前の石炭紀末期まで）、縦軸にそれぞれの地質時代に形成された河川堆積物ののタイプ別比率（網状/蛇行/分岐河川）がまとめられています。河川のタイプ分けは、それぞれの地質時代に堆積した河川堆積物の縞模様の特徴などから判定されています。この図から読み取れることは、420百万年（シルル紀末期）以前の河川はほとんどが網状河川であったが、420百万年前から急激に蛇行河川の比率が増えていることです。その原因の一つは地球環境の変化にあり、シルル紀が終わり次のデボン紀が始まる420百万年前から、陸上植物の繁栄が始まったことが化石から判っています。それ以前には陸上に植物はあまり存在しませんでした。陸上

河川流路の変化と地球環境



植物が増え、それが河川の流れを抑制し、根の部分に泥が堆積するようになって蛇行河川が増えたと考えられています。デボン紀の次の石炭紀になると陸上植物は更に大繁栄し、大森林が生じます。それに対応して、分岐河川の比率も増えていることも，この図に示されています。河川の形成メカニズムは物理的なものですが、それに生物相も大きく関わっていたことが判ります。

河川の満水時の水深（Point bar 堆積物の場合はその厚さで示される）が判ると、各種の経験式から、その河川の満水時の平均流量や川幅などを定量的に推定することが可能で、それにより古環境の変遷を復元することが出来ます。

川のタイプの変化に植物が本当に影響を与えるのかについて確かめるための水路実験の例があります。これは､幅 4 m × 長さ 9 m の水路を用いた実験で、はじめに水路底に砂を敷き、水を流します。植物が生えていない状態では、川の流路は側方へ自由に移動できる網状河川が形成されます。アルファルファ（イネ科植物）の種を蒔いて 2 週間経過すると、アルファルファが発芽成長し、それにより川の流路は制約され、流れが 1 本の蛇行河川に変化します。流路の位置が制約された分、川は底（下方）を侵食するようになり、川幅に対しての水深は相対的に増します。野外の実際の河川においても、川幅に対する水深は蛇行河川のほうが網状河川より深く、水路実験においてもこのような特徴が再現されています。

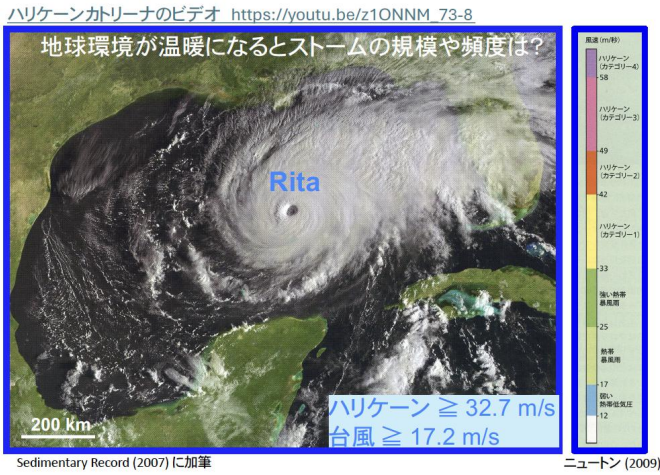
皆さま､今年 5 月にヨーロッパアルプスで氷河が溶けて大規模な土石流が発生し、下流の集落の 90%位が土石に埋まってしまった、との報道をご存じかもしれません。アルプスにおいては氷河の融解が進み、それにより水が下流側に多量に供給された結果、地下水面の上昇に伴ってそれまでよりも湿潤地が拡大し，植生が増えてきたことで，川のタイプが変化しています。過去 80 年分の航空写真を見較べますと、昔は流路が複数ある網状河川で森林や草原は下流域に限られていましたが、森林や草原はその後徐々に上流域にまで拡がり、流路は狭まり蛇行河川に変化しています。これは地球温暖化による植生の変化と、それにともなう河川流路の変化の一例です。

■嵐と波

地球環境の変化にともなう将来の自然環境の移り変わりに関して，私達の関心ごとの一つは，台風，ハリケーン，サイクロンなど，大型の嵐の規模が大きくなるのか、頻度が増えるのかがあります。地層の中には嵐の痕跡を示す縞模様が記録されているものがあり、このことについて次にお話します。

温暖な地球環境とストーム

ハリケーンカトリーナのビデオ https://youtu.be/z1ONNM_73-8



Sedimentary Record (2007) に加筆　　ニュートン (2009)

左の衛星写真は 2005 年 9 月に米国を襲った巨大ハリケーン Rita の、米国上陸前のメキシコ湾上での写真です。その 3 週間前には同様に強大なハリケーン Katrina も米国を襲いました。この時、メキシコ湾ではどのような現象が起こっていたのか、見てゆきましょう。

先ず波について。波には、風が吹いている場所（風域）で発生する波「風波・風浪）と、風域から抜け出てきた「うねり」があります。風波はその峰がとがっていて峰は横につなが

りません。これに対し，うねりは峰が丸く連続しています。波の規模は，風の強さ（風速）、風の吹く時間の長さ、風の吹く領域（風域）の長さ、これら 3 要素によって異なります。

波の峰から次の峰までの長さをその波の波長と呼び、風波は波長が短く、うねりは波長が長くなります。うねりは風域から外に出てきた波（したがって無風域でもうねり波が見られます）であるため、もはや風からのエネルギーを貰うことは出来ません。したがって，風域で形成された波の中でエネルギーの大きい波だけが，うねりとして遠くへ伝播していきます。

波にともなう堆積現象を観察する水槽実験を側面（断面）から見てみますと、波の高まりが沖から陸に向かってやってくると、水底（海底）の砂粒は陸側に移動し、波の凹みがやってくると、砂粒は沖側に移動します。波によって海底付近では砂粒が行ったり来たりする運動が発生します。この運動を発生させる流れは振動流と呼ばれ、地層の中にも振動流で形成されたベッドフォームや堆縞模様（堆積構造）が認められます。

波の峰から峰までの長さがその波の波長で、波の影響は沖合を伝播する波の波長の 1/2 の水深にまで及びます。例えば，波長 100 m の波であれば水深 50 m までは波の影響が及び、水深 50 m 以深には波の影響は及びません。波の影響が海底に及ぶ最大水深（沖合の波の波長の 1/2）は「波浪作用限界水深」と呼ばれ、海が穏やかなときには水深 5 m から 15 m 程度、嵐のときには水深 50 m から場合によっては 100 m に達することもあります。

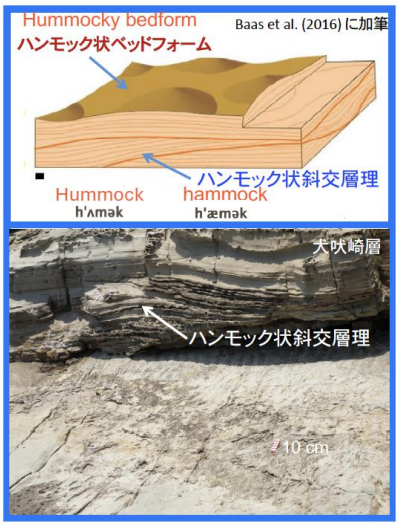
波がやってくる時の海中での水粒子の動きを側面から見ますと、波浪作用限界水深より深い海底の場所では円運動をし、 円の半径が水深の増加に伴って減少します。波浪作用限界水深より海底が浅くなると、水粒子は楕円運動をします。この場合，水深の増加に伴って楕円の長径が減少し，海底付近では直線的な往復運動となります。ただし，水深が沖合の波の波長の 20 分の 1 より浅くなると，水粒子の楕円運動の長径は水深の増加に関係なく一定で，海底付近では直線的な往復運動になります。水中映像で海藻が行ったり来たりゆらぐ場合は、その付近が波浪作用限界水深より浅いことを示しています。

■嵐と波による地層の縞模様

海底において波に伴うこれらの水流によって形成される堆積構造（縞模様）は特徴的で、地層表面には Wave ripple という凹凸のベッドフォームが、地層断面には規則正しいほぼ左右対称な堆積構造（Wave ripple 葉理）が、それぞれ形成されます。これらのベッドフォームや堆積構造が認められれば，その地層は波の影響下で堆積したことが判り、堆積構造のサイズから堆積時の波の規模を知ることができる場合もあります。

嵐の時には高潮現象が生じます。高潮は低気圧にともなう強風により波が掃き寄せられて海岸付近の水面が上がる現象です。その時にどのような堆積・侵食現象が生じるのか見てみたいと思います。九十九里浜の真亀川河口で 2019 年に観察された事例では、台風に伴う高潮の発生前には厚く堆積していた砂が、台風の通過後には大きく侵食されています。侵食された砂は、高潮に伴う流れによってどこか別の場所に運ばれたのです。実は運ばれた砂の一部は沖合にまで運搬され、嵐の時の堆積物として海底に堆積しています。高潮が発生すると海岸側（陸側）の水面が上昇し、それを解消するために陸側から沖合に向かう海水の流れが発生します。

複合流のベッドフォームと堆積構造



一方、嵐の時でも沖合から陸に向かう

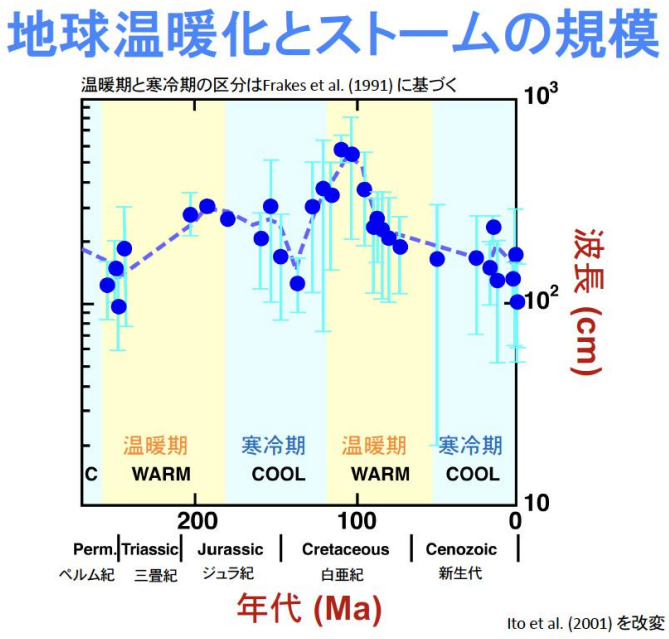
波は生じているので、この波と沖合に向かう海水の流れが組合されて、複合流が生じます。嵐の時に海底付近では複合流が生じ、それにより形成される特徴的な堆積構造は、「ハンモック状の斜交層理」と呼ばれます（前頁の図と写真）。ハンモックといってもつり床のハンモック hammock ではなく、小丘を意味する hummock なのですが、地層表面にはごく小さな丘が 1 m～2 m 間隔で並んだベッドフォームが、断面ではゆるくうねった縞模様が形成されます。このような堆積構造のある地層は、嵐の影響下で堆積したものと判定できます。

犬吠埼灯台の下には白亜紀の前期のおよそ 1 億 2000 万年前の、砂岩と泥質岩が交互に堆積してできた地層（砂岩泥質岩互層）が露出します（前頁の写真）。これらの砂岩中には頻繁にハンモック状斜交層理が見られ、嵐の複合流の下で堆積した地層と判ります。砂岩の表面はゆるくうねってハンモック状ベッドフォームの特徴が認められることからも、これらの砂岩が嵐の影響下で堆積した地層であることを示しています。

因みに、嵐は英語で Tempest です。岩石の名前には「...ite」という接尾辞を付けることが一般的で、嵐の影響下で形成された堆積岩は Tempestite（テンペスタイト）とも呼ばれます。同様に津波によって形成された堆積岩は Tsunamiite(ツナミアイト)、南米アンデス（Andes）山脈に分布する代表的な火山岩は Andesite(アンデサイト)です（日本語名は安山岩で、日本でも随所に分布します）。

■地質時代の嵐の規模

さて、先ほど衛星写真で見たハリケーン Rita、及びその 3 週間前にハリケーン Katrina が襲来した後、海底調査が行なわれ、この 2 つのハリケーンによってメキシコ湾の沿岸から浅海域に運ばれた堆積物の厚さの分布が明らかにされました。その結果，水深 50 m 付近の海底では、厚さが 10 cm～15 cm のハリケーン起源の堆積物が確認されました。犬吠埼灯台の下の地層は、水深がおよそ 50 m より浅い海底で形成された砂岩層と泥質岩層で構成されていますが，厚さが 50 cm～60 cm を超える砂岩層が頻繁に見られます。このことから，これらの砂岩層はハリケーン Katrina や Rita よりも遥かに強大な嵐の影響下で堆積した可能性があります。1 億 2 千万年前は現在よりも地球環境が温暖だったことが分かっています。したがって，当時の嵐は、現在発生する嵐よりも遥かに規模が大きかった可能性があるのです。

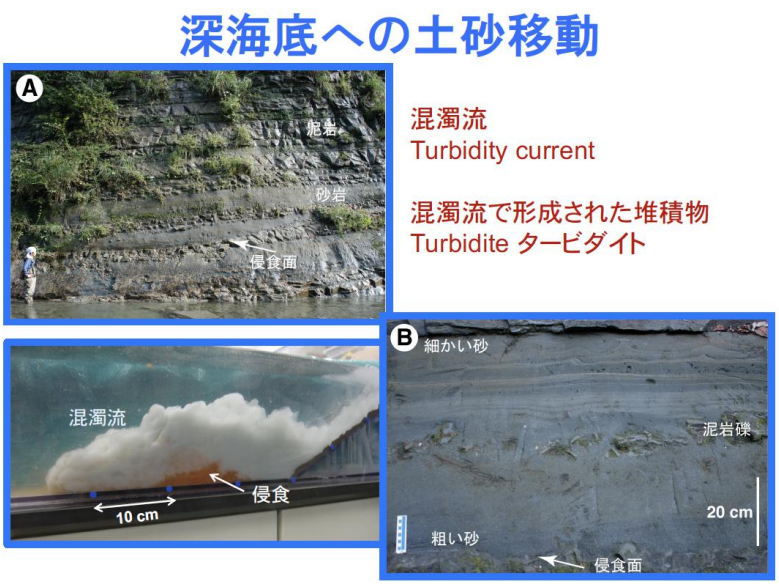


左の図は、横軸に地質年代、縦軸に異なった年代に形成されたハンモック状斜交層理の波長がまとめられたものです。白亜紀の堆積物で特にハンモック状斜交層理の波長が長く、そのことは嵐の規模が強大であったことを示している可能性が考えられます。特に，白亜紀の中頃である 1 億 2 千万年前から 1 億年前は地球が著しく温暖化した時期で、南極にも北極にも氷が存在しませんでした。その時期が、ハンモック状斜交層理の波長が特に長い時期、すなわち巨大嵐が存在した可能性がある時期に対応しています。このような特徴から，将来地球温暖化が更に進んだ場合、白亜紀と同じように、巨大嵐が発生するようになるのかもしれません。

■深海堆積岩の縞模様

次に、深海底に堆積した地層を見てみましょう。次頁の写真は養老渓谷に広く露出する地層の例で、深海底堆積物の好例です。砂岩と泥岩が交互に堆積しており、堆積時の水深は 500 m から 1000 m 程度であったと推定されています。砂岩の多くは、混濁流と呼ばれる海水と土砂が混合した海水よ

りも密度の高い流れによって，浅い海底から深海底まで運搬され、そこに堆積した地層です。混濁流の流れ下る流速は時速 60 km≧に達する場合があり、通信用海底ケーブルを切ってしまうことがあるため、混濁流を理解することは、私たちの通信インフラの保全にも役立ちます。



水槽実験で混濁流を再現すると（左下写真）、斜面に堆積していた堆積物が混濁流によって削り取られ、混濁流の中に取り込まれて流れ下ることが判ります。このように混濁流は海底を削り取る力が強く、混濁流により堆積した地層では、砂岩層の基底部は直下の泥岩層を削り込んでおり、砂岩層の中に削り取られた泥岩の礫が含まれている場合がしばしば見られます（右下写真）。

さて養老渓谷の地層においては、場所により砂岩が厚めの場所（砂岩の厚さ＞泥岩の厚さ）と、泥岩が厚めの場所（砂岩の厚さ＜泥岩の厚さ）があります。例えば弘文洞跡では泥岩が厚く、観音橋の近くでは砂岩が厚いと言うような変化が認められます。養老川沿いに砂岩と泥岩の厚さの変化を詳しく調査すると、砂岩が厚い部分と泥岩が厚い部分の組合せが 9 回繰り返しています。地層の年代を詳しく調べると、一つの組合せはおおよそ 4 万～5 万年で形成されたことが明らかです。このことは何を意味するのでしょうか?

養老渓谷の地層における 4 万～5 万年の意味を考えるにあたり、ヒントとなる例を遥か離れたメキシコ湾で見てみましょう。メキシコ湾には油田ガス田が大変多く、油井ガス井から得られた地下（海底下）の地質情報がきわめて豊富で、これら地質情報から、以下のことが判っています。

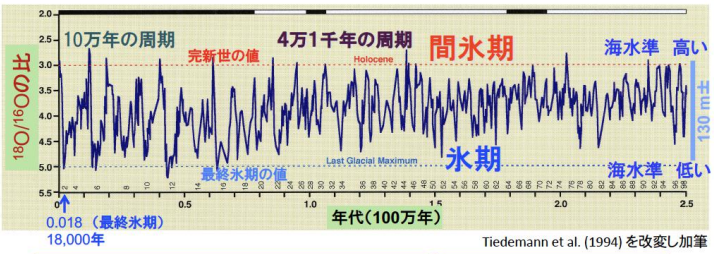
- 現在のメキシコ湾の海底は、水深が深い大陸斜面と深海底においては全てが泥で覆われている。
- 1 万 5 千年前より前のメキシコ湾においては（当時は海水面が現在より約 100 m 程度低かった）、現在の大陸棚は海面上すなわち露出して陸になっており、そこに川が流れて谷が形成されていた。その結果，河口部（現在の大陸棚の縁辺部）付近に三角州が形成されていた。沖合に向かう海底斜面には、河口部から連続する海底の流路が形成され、その流路に沿って砂が運搬され堆積していた。
- すなわち、海面が高い時代には粗粒堆積物（砂や礫）は沖合・深海まで運搬されづらく、海面が低い時代には粗粒堆積物が深海底まで運搬され易いことが確認されます。

■有孔虫化石の酸素同位体比と地球環境

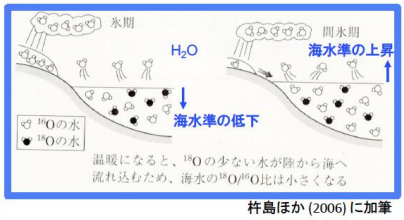
堆積岩にはしばしば、有孔虫（ゆうこうちゅう）という微小な海生原生生物の殻（炭酸カルシウム $CaCO_3$ から成る）の化石が含まれます。有孔虫化石の $CaCO_3$ に含まれる酸素の 0（オー）の 16 と 18 の同位体比を調べることにより、その有孔虫が生きていた当時の海水中の水 H_20 の酸素同位体比率も判り、その値から、当時の気候が温暖であったか寒冷であったかが判定できます。

軽いオー 16 から成る H_20 は、重いオー 18 から成る H_20 より蒸発し易く、このため、海から蒸発した水蒸気が雪となって降り積もり形成される南極や北極の氷は、軽いオー 16 を海水より多く含みます（一方海水には重いオー 18 が取り残され、その濃度が増します）。極域の氷の量が増す寒冷期（氷期）には海水中のオー 18 比率がより大きくなり、温暖期（間氷期）には極域の氷が溶けるため、オー 18 の少ない水が海にもどるので、海水中のオー 18 比率は減少します。この比率の増減が有孔虫化

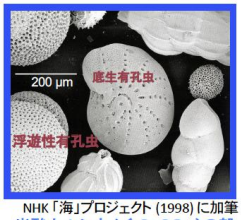
気候変動の周期



Tiedemann et al. (1994) を改変し加筆



杵島ほか (2006) に加筆



NHK「海」プロジェクト (1998) に加筆
炭酸カルシウム（$CaCO_3$）の殻

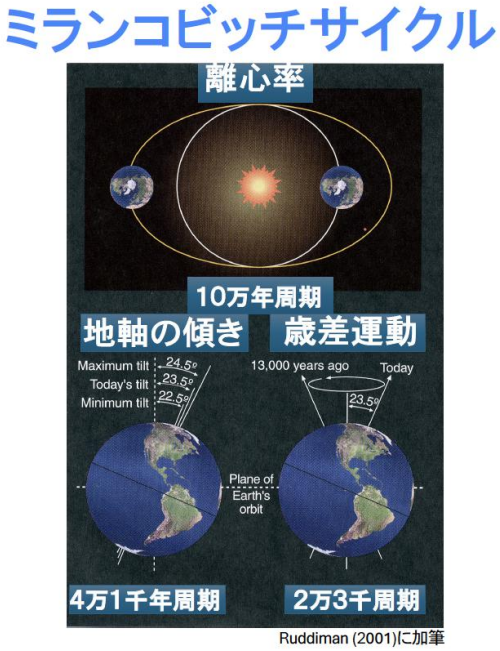
石の $CaCO_3$ 中の酸素に記録として残されているため、有孔虫化石の酸素同位体比から地球が寒冷化あるいは温暖化した時期が判るのです。

左のグラフは、横軸に地質年代（250 万年前から現在まで）、縦軸に有孔虫殻化石の酸素同位体比の変化がまとめられています。重い酸素同位体オー 18 が減るとグラフは上側に振れ、そのことは当時の気候が温暖化し海水面が上昇したことを示します（温暖化により極域の氷が溶けるため）。グラフは年代にしたがって上下に変動しており、海水面が最も高かった時代（グラフが上に振れたピーク）と最も低かった時代とでは海水面に約 130 m の差があります。グラフの変動には規則性が見られ、250 万年前から約 80 万年前までは、約 4 万 1 千年の周期で温暖化と寒冷化が繰り返されています。4 万 1 千年という値は先ほどの養老渓谷の地層の 1 回分の組合せの間隔（おおよそ 4 万～5 万年）に近いですね。この地層が深海底に堆積したのは 100 万年から 80 万年前で、このグラフの 100 万年～80 万年前のグラフの上下変動、すなわち温暖化寒冷化の変動に対応した時期であり、メキシコ湾の例で見たように、温暖化によって海面が上昇すると深海域への砂の供給は不活発で，泥の堆積が卓越するのに対し、寒冷化によって海面が低下すると混濁流により深海域に砂が活発に供給されて砂岩が厚く堆積すると考えられます。このような変化が 4 万～5 万年周期で生じていたことが、養老渓谷で観察される地層に示されている可能性があります。

■地球の公転自転とミランコビッチ・サイクル

右の概念図に示されるように、地球の公転と自転には周期的な変動が生じることが判っています。

- 地球の公転軌道（太陽の周りを回る楕円軌道）は 10 万年周期で変動し、それにより太陽−地球間の距離が 10 万年周期で増減します。
- 地球の自転軸は傾いており、傾きの角度が 4 万 1 千年周期で変動します（最小 22.5° から最大 24.5° まで変化。現在は 23.5° ）。
- 地球の自転は歳差運動（回転するコマが首を振る運動）をしており、首振りの周期は 2 万 3 千年です。

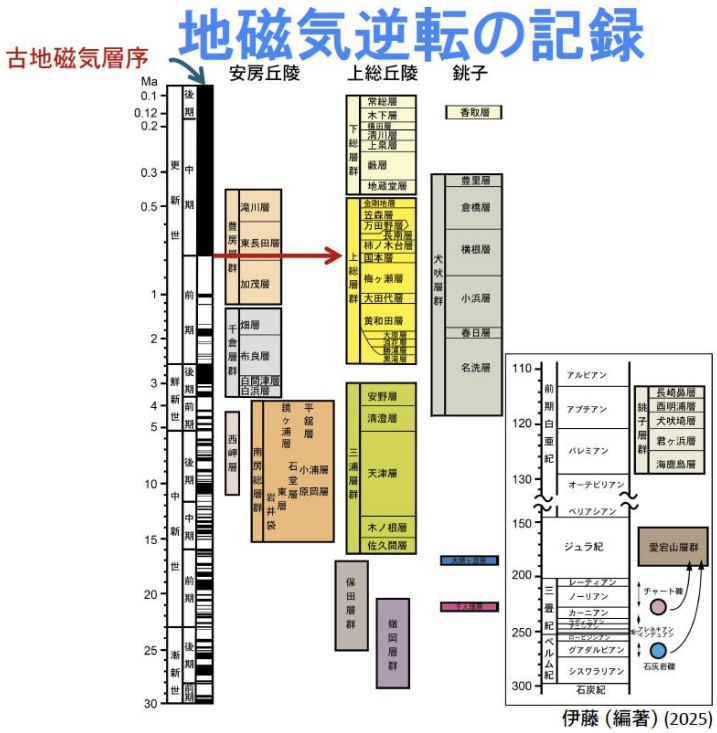


Ruddiman (2001)に加筆

以上 3 つの公転と自転の周期的な変動の組合せにより、地球の太陽からの距離や、特に陸地の多い北半球が太陽光線の照射を受ける面積と角度が変動し、そのことが温暖化と寒冷化をもらたす大きな要因の一つになります。この 3 つの周期（10 万年、4 万 1 千年、2 万 3 千年）の組合せにより、地球の温暖化と寒冷化が進行します。この説は旧ユーゴスラビアの天文学者ミランコビッチが 1900 年代初頭に提唱し（周期は計算によって求め）、そのため温暖化寒冷化の周期は「ミランコビッチサイクル」と呼ばれます。次回養老渓谷の散策で砂岩泥岩の地層を眼にされた時は、それらの砂岩泥岩の厚さの変化にミランコビッチサイクルによる温暖化と寒冷化が記録されているのだ、と想い巡らして頂ければ幸いです。

■チバニアンと地磁気の逆転

最後に、チバニアンと地磁気の逆転についてお話させて頂きます。



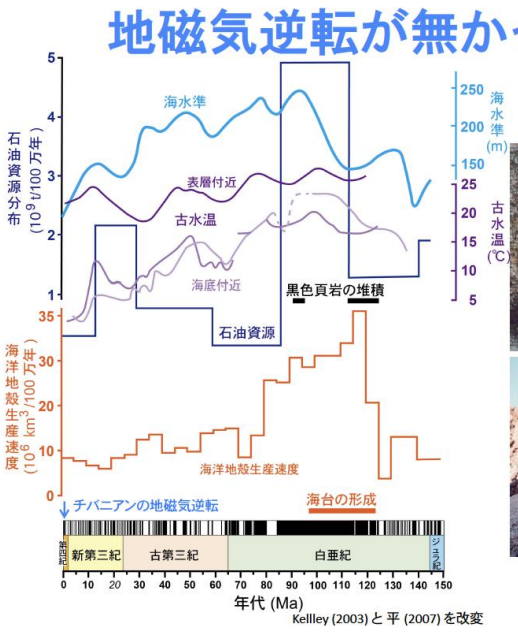
左の図は縦軸に地質年代（30 百万年前から現在まで）をとり、地磁気が現在と同じ時代を黒塗りで、現在と反転していた時代を白塗りで示したものです。それぞれの年代に堆積した房総半島に分布するいろいろな地層名が記されています。チバニアンという言葉はある特定の地質時代（77 万 4 千年前から 12 万 9 千年前）を表わす名称で、この図では左にある矢印がチバニアンが始まった年代（77 万 4 千年前）を示します。チバニアン以降は地磁気は現在までずっと同じで（磁石の N 極が北を指す）黒塗りが続いていますが、それ以前の地磁気は白黒の縞模様で、ひんぱんに地磁気が逆転していたことが判ります。

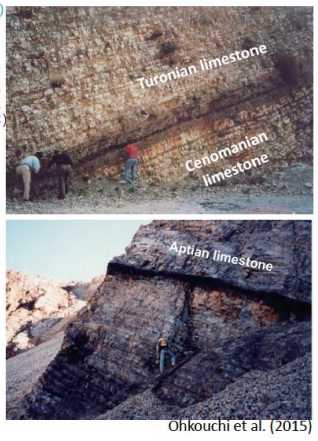
チバニアンが始まった 77 万 4 千年前は、国本層（こくもとそう）という泥質岩の卓越する部分と厚い砂岩が卓越する部分が 2 回繰り返される地層の中部の泥質岩の卓越した部分が堆積した時代に対応しています（右の写真）。詳しく調べると、地磁気がそれ以前と逆転し現在と同じになった時期は 77 万 3 千年前で、国際的に定義されたチバニアンの始まりとは 1000 年の差異があります。

地磁気の逆転のし方はユーチューブの動画で閲覧できます。ただし，地磁気がどのようなメカニズムで生じるのか，またどのような要因で逆転するのかについては、まだ明らかになっていないことも多くあります。

■中生代の地磁気と海洋環境

地磁気の逆転を、中生代ジュラ紀までさかのぼって見てみましょう。





左の図は横軸に地質年代（150 百万年前から現在まで）と地磁気の向き（白黒縞模様）をとり、タテ軸にはさまざまな地質現象、海面の高さ、海水温度（表層付近と海底付近）、石油資源の量、などの時代ごとの変化が示されています。恐竜全盛時代の白亜紀の中頃である約 120 百万年前から 85 百万年前は、地磁気が現在と同じ黒塗りの状態が約 3500 万年間も続きました。この時期の海水準（海面の高さ）は現在より 250 m 高く、海面の表層温度は 25℃強、海底

の水温は20℃弱でした。現在の海底付近の水温は赤道付近でも高緯度でも一律にほぼ2℃程度ですので、白亜紀の海はとても暖かく、かつ表層付近と海底付近の水温差が小さかったという特徴があります。水温の差が小さいと、活発な対流が生じません。対流が活発な現在の海と異なり、白亜紀の海は暖かく澱んだ海だったのです。澱んだ海では海底付近の海水の酸素が欠乏します（酸素豊富な表層海水を海底に運ぶ活発な対流がないため）。海洋生物は死ぬと海底に沈み、それをバクテリア（多くは好気性バクテリア）が分解しますが、白亜紀の海底は酸欠状態であったため、海洋生物遺骸の分解が進みません。すると海底に生物遺骸のヘドロが溜まります。その代表的なものが、この図に示された「黒色頁岩の堆積」現象です。黒色頁岩は真っ黒いヘドロが固まった岩石です。

右上の写真に見える黒い地層は約9千万年前の黒色頁岩、右下の写真の黒い地層は約1億2千万年前の黒色頁岩です。白亜紀の中頃の海は海底にヘドロが溜まる澱んだ海だった訳ですが、実はこのヘドロは、私たち現代人類に素晴らしい恵みを与えてくれています。この図には石油資源の量の大小も記されており、白亜紀に堆積した地層に含まれる石油資源の量が飛びぬけて多いことが判ります。実は石油資源の多くは（全てではありませんが）、こうした生物遺骸からなる黒色頁岩から生成されたことが判っています。日本が中東から輸入している石油の多くは、白亜紀のヘドロ起源なのです。

この時代の海水面は現在より250 mも高く、これは強い地球温暖化により極域の氷が全て溶けていた時代です。強い温暖化は強い嵐を発生させる可能性があり、犬吠埼灯台の下に見られる、巨大な嵐を記録した縞模様を示す砂岩が堆積したのは120百万年前から100百万年前で、まさにこの時代です。

この図には「海洋地殻生産速度」も示されています。海洋地殻はマントル対流によって海嶺（巨大な海底山脈）で生産され、海嶺の左右に順次（ベルトコンベアのように）拡大移動し、その過程で冷えて重くなり水深が増し、最後はプレートの沈み込み帯で地球内部に沈降します。この図には白亜紀の中頃に海洋地殻の生産速度が増加したことが示されており、大量に生産された若い海洋地殻は水深が浅く、したがって水深の浅い海域の面積が増大することで海の容積が減少したことが，海水面を高くした重要な要因であったと考えられています。また、この図には示されていませんが、白亜紀の中頃には世界各地で巨大な火山噴火が生じ、海域においては大規模な噴火の結果，巨大な海台が形成され、そのことも海水面を高くした要因と考えられています。

白亜紀の中頃の世界各地の大規模な火山噴火は、大量の火山ガス（その中にはCO_2が多く含まれる）を大気中に放出し、そのことも白亜紀に強い地球温暖化が生じた一因であったと考えられており、更なる研究が進められています。

■地磁気の発生と逆転の原因

地磁気が生じる原因は、地球深部の核（コア）のうち外核部（鉄とニッケルが高温高圧下で流動化している）において、流体鉄ニッケルの対流によって電流が生じ、その電流が磁場を発生させている、との考えが主流です。地磁気逆転の原因はまだ十分解明されていませんが、鉄ニッケルの対流が安定していれば電流も磁場も安定し、地磁気逆転は生じないであろう、しかし対流が何らかの原因で乱れると、地磁気逆転が生じるのではないか、と考えられています。外核表面と外核深部の温度差が安定していれば対流も安定し、温度差に乱れが生じると対流は不安定化するはずです。白亜紀の中頃に、3500万年もの長期にわたって地磁気逆転が生じなかった原因は解明されていませんが、この時期には世界各地で巨大な火山噴火が活発化し、そのことが外核の表面と深部の温度差を安定化させることに貢献して地磁気逆転が生じなかったのではないか、との仮説も出されています。

本日は堆積岩の地層に見られる縞模様と、それが示す地球環境に関する話題を主体に、チバニアンと地磁気の話も加えて講義させて頂きました。皆さまも今後野外を散策される折、地層が眼にとまった時には、その縞模様と岩相から、当時の気候や海面の高さなどが読み取れることに想いを巡らせて頂ければ幸いです。ありがとうございました。

【質疑応答】

Q1： 現在社会で議論となっている地球温暖化について、人間活動による CO_2 他の温室効果ガス排出と、火山噴火等の地球規模の自然現象と、どちらが現在の温暖化の主因であるか明らかされているのでしょうか?

A1： 現在の温暖化は温室効果ガスの影響ではなく太陽活動の影響であろう、と考える研究者もまだおります。ですがさまざまな証拠から見ると、過去約 100 年間に大気 CO_2 濃度は確実に増加しており、それに対応してさまざまな異常気象が起きています。温暖化の原因は人間活動による温室効果ガスの増加ではなくそれ以外にある、とはもはや言い切れない時代に入ったと思います。先ほどミランコビッチサイクルのお話をさせて頂きましたが、現在から 1 万 8 千年前は「最終氷期」と呼ばれ、強く寒冷化した時代でした。それ以降、温暖化で気温が上昇し、現在からおよそ 7 千年前（縄文時代）に最近としては最も暖かくなりました。その当時は九十九里浜においては海面が現在より 5～6 m 高かったことが判っています。その後は寒冷化に転じており、自然の摂理として本来は現在は寒冷化へ向かって行く段階に入っているべきなのですが、現在観測される温暖化はそれに逆行しています。

Q2：地層が形成された年代（堆積岩の場合、その地層が堆積した年代）は、どのように判定されるのでしょうか?

A2： 多くの場合、質量分析計という装置を用い、岩石鉱物中の同位体元素の比率を求め（どの元素を用いるかはケースバイケース）、その同位体元素の半減期と比較してその岩石が形成された数値年代を求める方法が用いられます。堆積岩の場合は、それぞれの時代に特徴的な生物化石が含まれることがあり、化石によって堆積時期の相対的な新旧を判定し、更に同位体によって数値的な年代が求められます。

Q3：例えば蛇行河川における堆積（Point bar 堆積物の形成）と侵食を考えた場合、堆積や侵食はどんなタイミングで進むのでしょうか?

A3：ご指摘いただいた通り、堆積岩の堆積や侵食は日々少しずつコンスタントに進むというよりも、ある時にある出来事がイベント的に発生し，一気に進む場合が多いと考えられています。河川であれば流量が普段より増えて川岸を大きく削ったり、逆に大量の土砂が運搬されて堆積するなどの現象です。銚子の屏風ヶ浦で波によって崖が侵食され後退する現象も、毎日少しずつではなく、あるとき一気に崖が崩壊して後退が進みます。

Q4： 海面の上昇と下降について。過去最大の上下変動幅はどの位の値でしょうか?

A4： 先ほどご紹介した、白亜紀における海面（最大期には現在より 250 m 高かったと見積もられる）が過去最大のものと思われます。この見積もりは研究者によって若干値が変わりますが、見積もりの方法は、海水の全量は現在の「海水＋極氷が全て溶けた場合の水量」と同じと想定し、海水の容れ物としての海底面の凹凸を、巨大噴火によって付加された海台の体積や、大量に生産された若くて水深が浅い海洋地殻の平面積などを考慮して算定すると、おおよそ海面が現在より 250 m 上昇したとの結果が得られています。いっぽう過去 50 万年間では、氷期には海面は現在より 120～130 m 下がっていました。1 万 8 千年前の氷期においても最大で 130 m くらい下がっていたと考えられ、その後に 130 m も上昇して現在の高さになっています。現在の大陸棚の縁辺部には、かつてそこが海岸線付近であったことを示す岩石や地層の特徴が確認されており、氷期で海面が低下した時期には現在の大陸棚の多くがが陸化していたことが判ります。

なお海面の変動には 2 つの種類があります。一つは大陸氷河などの融解や増大による全地球規模の海面の上昇下降、もう一つは地域地域で異なる地殻変動（地殻の隆起沈降）による局所的な海面の下降上昇です。2024 年 1 月の能登半島地震では地盤が 4 m 隆起した地域があると報道されており、それらの地域においては海面が 4 m 低下しましたが、隆起しなかった他の地域においては海面は変化していません。

伊藤　慎（いとう まこと）先生のプロフィール

1956 年　千葉県に生まれる
1985 年　筑波大学大学院博士課程地球科学研究科地質学専攻修了（理学博士）
1999 年　千葉大学教授
現 在　千葉大学名誉教授・グランドフェロー
東海大学海洋研究所客員教授
放送大学千葉学習センター客員教授

主な著書　地球環境の復元（共編，朝倉書店，2005）
堆積構造の世界（総編集，朝倉書店，2022）
房総半島の地層と岩石のフィールドガイド（編著，コロナ社，2025）