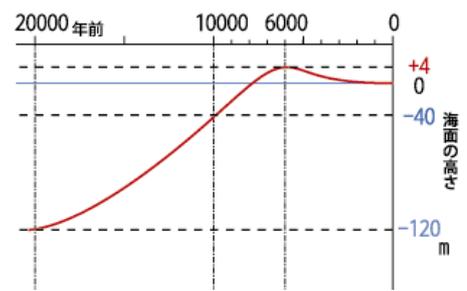


海面が上下する！
海面が低かった時代は気温が低く、海面が高かった時代は気温が高いことが分かっています。これは地球全体で起きている現象です。一定の周期で繰り返しているようです。

どうやって調べるの？
海面の変化は、地面の下に記録が残されています。地層や化石の種類や埋まり方を丹念に調べていきます。

「海退」
海進とは逆に、海が退き、陸地が広がることを海退といいます。

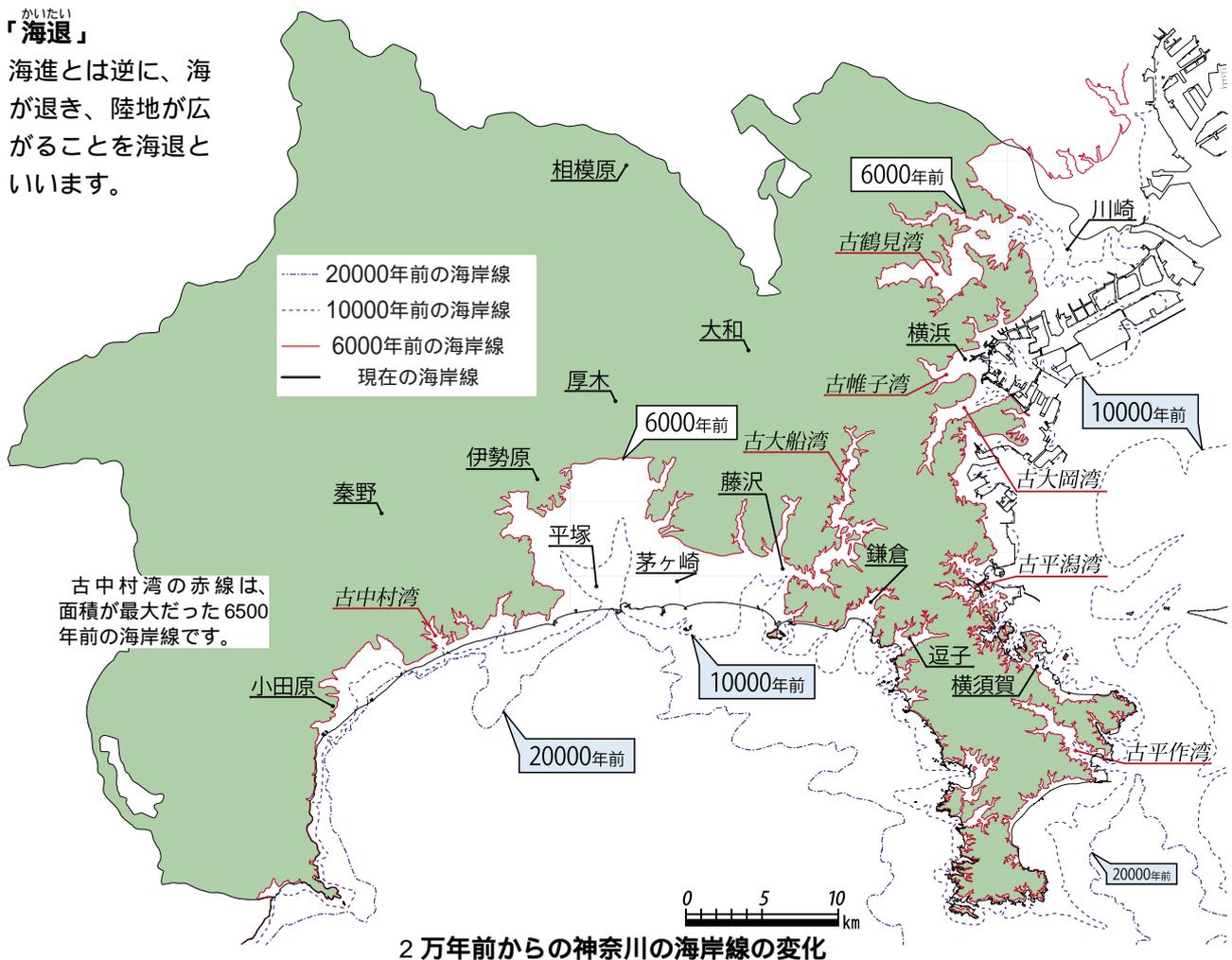
動く大海岸線！
6000年より前の神奈川県はどうだったのでしょうか。下に2万年前からの変化の図があります。およそ2万年前は陸が広がったことが分かっています。水深120mぐらいのところまで陸だったと考えられています。ここから、時間が進むと海面が高くなり、およそ6000年前には標高4m前後まで海になります。さらに5000年前からは海面が下がりはじめ今に至ります。これをモデルにしたのが右の図です。この海面の高くなっていく様子が、海が陸のほうへ進んでいくので「海進」、特にこの縄文時代の海進を「縄文海進」と呼んでいます。



海面の高さの変化モデル図

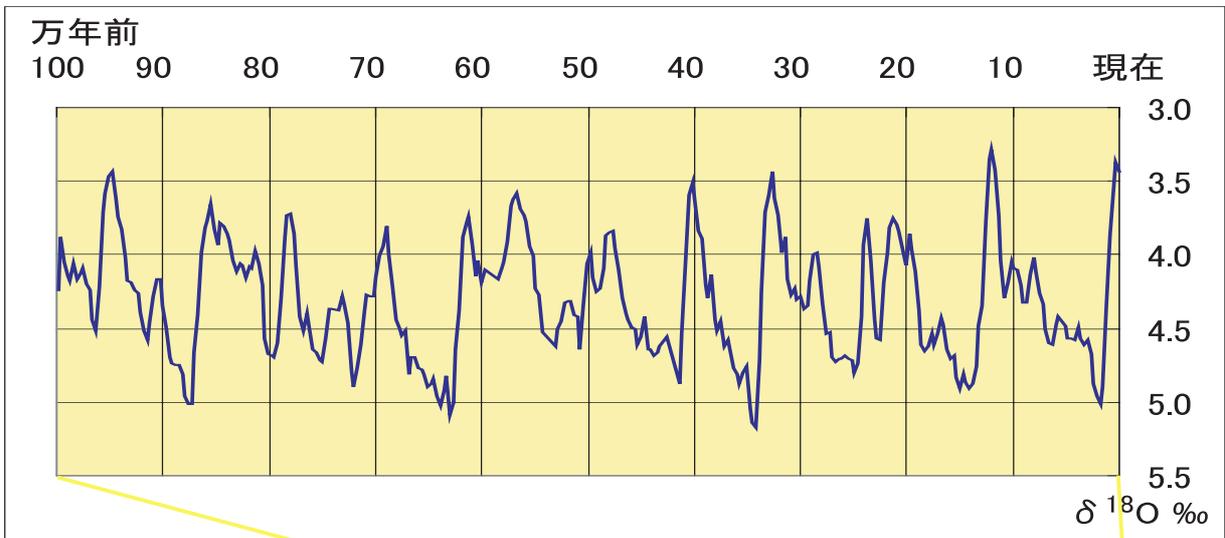
入り江の秘密

6000年前の海岸線で入り江になっているところでは、1万年前の海岸線を見てください。やはり入り江になっています。これは、大地が古い時代から削られ続けていたことを示しています。現在、これらの場所は奥深い谷になっています。



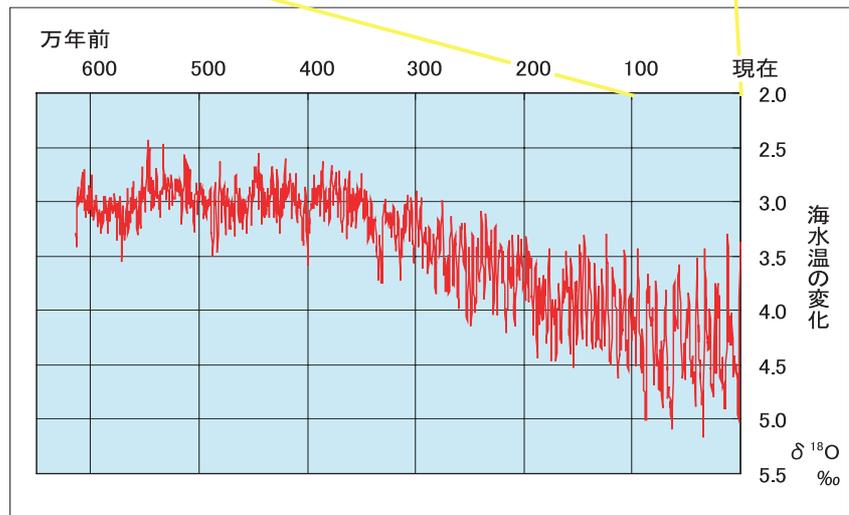
2万年前からの神奈川の海岸線の変化

過去の気温はどうしてわかるの？



深海底に残された記録

右の図は、海の底にたまった堆積物から得られたデータを元にして、600万年間の酸素同位体比の変化をグラフにしたものです。船の上から海底堆積物を柱のように掘りぬいた「コア」として採取し、その中に含まれる微化石を分析します。横軸は時間です。縦軸は¹⁸Oです（酸素同位体については裏面を参照してください）。上に行くほど温暖で下へ行くほど寒冷な気候であったことがわかっています。横軸の右端が現在です。グラフは大きな振幅を描きながらも、右下がりになっているのが読み取れます。右の図の最近100万年分を拡大したのが上の図です。2万年くらい前から急激に気温が上がり、ちょっとだけ寒くなってきたところだということがわかります。



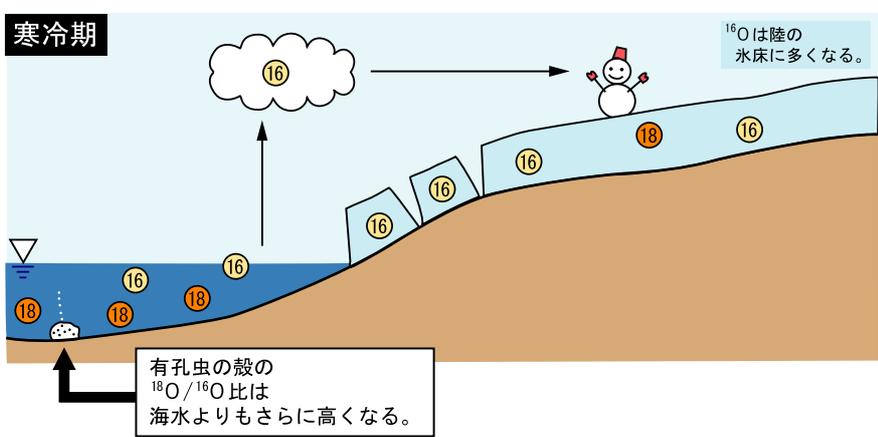
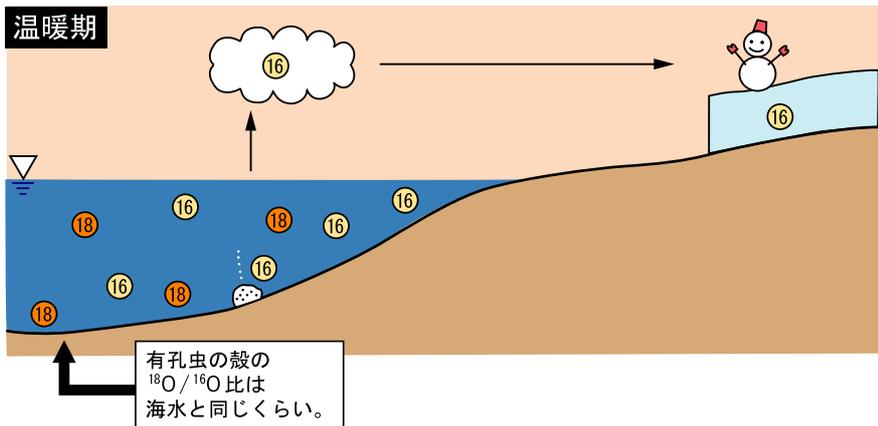
【グラフを読みましよう】

気温の上がり方と下がり方と比べてみましょう。

周期はあるのでしょうか？

山や谷の形に変化はあるのでしょうか？

上のグラフは次の URL からダウンロードしたデータを使って作成しました。 <http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/paleocean/specmap/specmap2/odp6771stretch>



ります。有孔虫が死ぬとその殻は海底に堆積していきます。つまり海底にそのときの海水中の¹⁸O / ¹⁶O比を記録し続けてくれるのです。さらにこの殻には、水温が低いほど¹⁸Oが多く取り込まれることもわかっています。

海底をボーリングしてコアを採取し、その中に含まれる有孔虫化石の¹⁸O / ¹⁶O比を測定することでその化石が堆積した当時の水温を推定することができます。

ただしこの方法はその当時の海底が現在も残っていることが条件です。海底（海洋プレート）は海嶺で作られ、海溝へ沈んでいきます。現在知ら

れているもっとも古い海底はジュラ紀後期にできた物です。

【グラフから】

気温が上がるときには一気に頂点まであがりますが、下がるときにはギザギザに、あるいは階段状に下がります。

山を数えても谷を数えても、8万年から12万年くらい、平均すると10万年くらいの周期がありそうです。

40万年前以降は、それ以前に比べて、より振幅が大きくなっているように見えます。

(デルタ)¹⁸Oについて

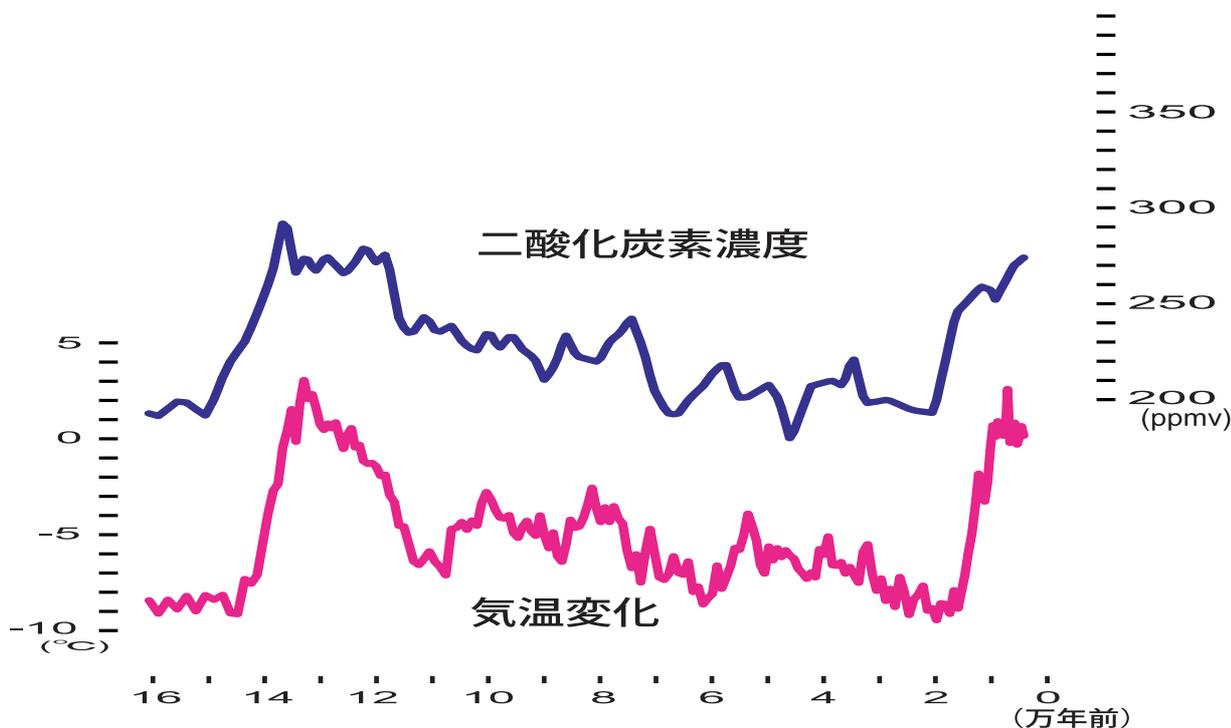
$$^{18}\text{O}(\text{‰}) = \left\{ \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{PDB}}} - 1 \right\} \times 1000$$
 で、求められます。ここで、sampleは目的の試料を、PDBは基準となるPee Dee層産のベレムナイトを指します。

酸素には3種類の安定同位体あんていどういたいがあります。酸素のほとんど(99.762%)は¹⁶Oで、残りのほとんど(0.200%)は¹⁸Oです。¹⁷Oもごくわずか(0.038%)に存在していますが、話を簡単にするために、ここでは無視します。¹⁸Oは¹⁶Oに比べてわずかに重く、蒸発しにくいので、氷床の氷には¹⁶Oの割合が高くなります。寒冷的な気候で氷床が発達すると、¹⁶Oは氷床で多くなり、海水の¹⁸Oは濃くなっていきます。

海にすむ原生動物である有孔虫ゆうこうちゅうは海水中のイオンを材料にして、炭酸カルシウムCaCO₃で殻を作

参考文献
 町田ほか編著、第四紀学、朝倉書店

過去の気温はどうしてわかるの？



氷床コアが記録する大気の変遷

氷床の氷は雪がさらにその上に降った雪の重みで固まったものです。そのため氷はたくさんの空気を閉じこめています。空気は押し込められて高い圧力がかかっているため、氷を溶かすとプチッ、パチッとかな音を聞くことができます。氷床に閉じこめられているのは雪が降った頃の空気です。氷床をボーリングしてコアを採取し、その空気を取り出して成分を調べれば、当時の空気組成を知ることができます。二酸化炭素やメタンなどの温暖化ガスの含まれる割合を知ることで、当時の気温を推定することができます。ただし、この方法は昔の氷が氷床に残っていることが条件です。最近まで、ボーリングコアが採集できたもっとも古い氷は南極にあるポストーク

基地の 3623 m でおおよそ 42 万年前、2 番目はドームふじ基地の 2504 m でおおよそ 34 万年前でした。ドーム C で 3109m のコアが採取され、74 万年までのデータが発表されました。ドームふじでは 3000m 以上のコアを採取し、80 万年前までのデータを得ようと計画されています。

上の図はポストーク基地のデータの一部です。これを見ながら考えてみましょう。

100 万年以上前の南極の氷はどうなったのでしょうか？

二酸化炭素と気温はほとんど同じように変化していますが、このことから温暖化ガスが増えたから気温が上がったといえますか？

CO₂ = 二酸化炭素
 CH₄ = メタン
 H₂O = 水 (蒸気)

温暖化ガス

温暖化ガスとして注目されているのは二酸化炭素とメタンのよう
 です。しかし、もっとも影響が大
 きい温暖化ガスは水蒸気で、温室
 効果の8割以上を担っていると考
 えられています。さらに、気温が
 上がると海水の蒸発が促され、空
 気中の水蒸気量は多くなり、気温
 の上昇を促進するでしょう。空に
 雲のない冬の朝、^{ほうしゃれいきやく}放射冷却現象
 によってさらに気温が下がること
 で私たちは水蒸気(厳密に言えば
 雲は氷の粒ですが)の保温効果を
 体感しています。

とはいえ、水蒸気は人の力では
 どうしようもありませんので、人
 の努力で増やさないことができる
 二酸化炭素やメタンなどが注目さ
 れるわけです。

100 万年以上前の南極の氷は
 どうなったのでしょうか？

厚いところでは 3000m もある

南極の氷は内陸から海へ向かっ
 て流れています。そのスピードは
 山岳氷河などに比べて非常にゆっ
 くりしています。それでも氷は流
 出してしまいます。また、地面と
 の摩擦で削られたり、地熱で溶け
 たりものします。氷は減って
 いきます。そこでドームふじは氷
 が流れ出しにくい南極大陸の真ん
 中付近をねらって建設されました
 (下図参照)。

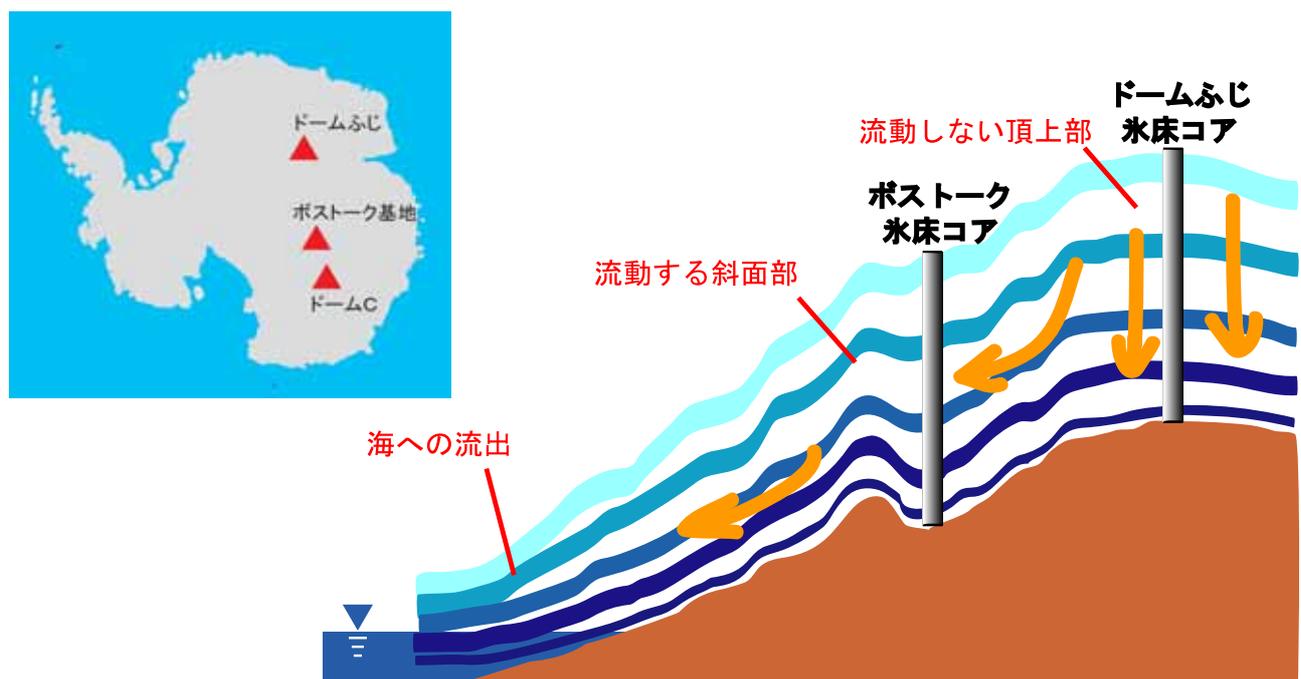
二酸化炭素と気温はほとんど同
 じように変化しているのに、温暖
 化ガスが増えたから気温が上がっ
 たといえますか？

おもての図では判断することは
 できないでしょう。この図から
 いえることは振幅は違ってほ
 ぼ同時にピークに達し、同時にギ
 ャップを迎えているということ
 です。ただ、二酸化炭素濃度と気温
 には強い相関があることが伺えま
 す。

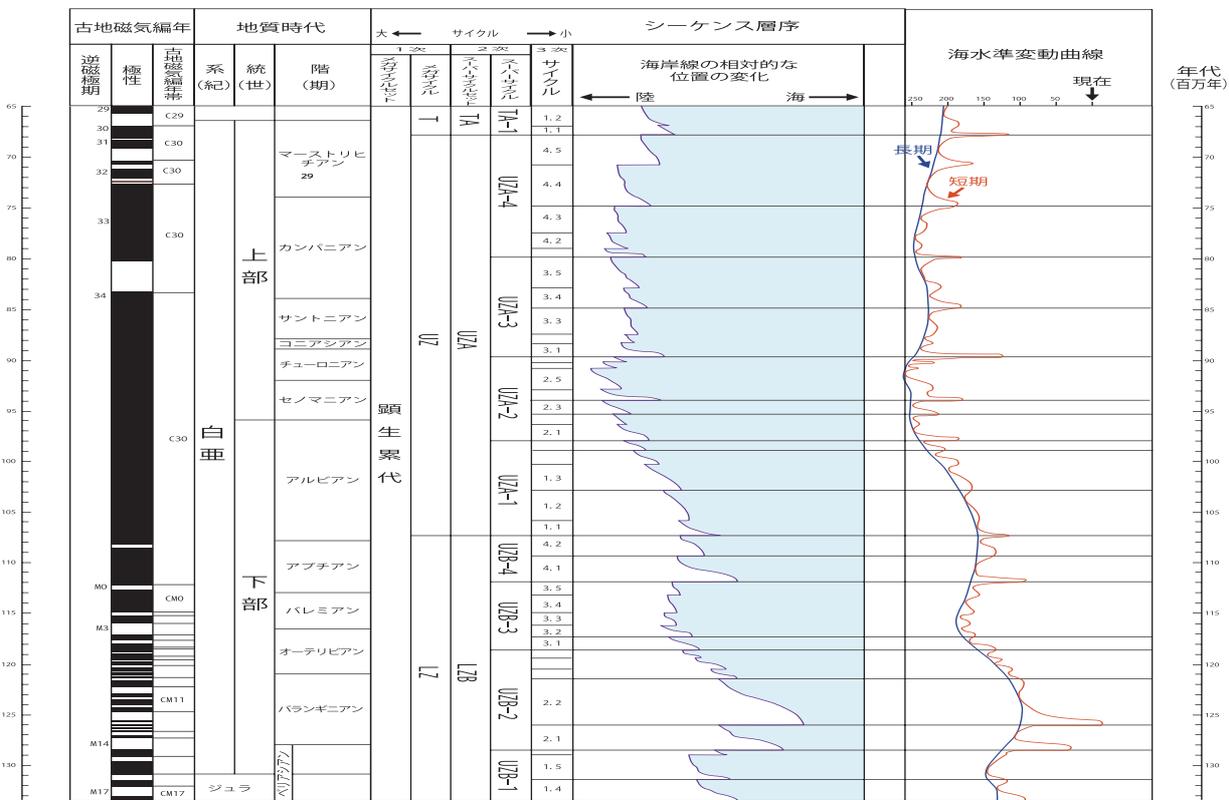
参考文献

EPICA commu-nity members,
 2004. Eight gla-cial cycles from
 an Anterctic ice core. Nature,
 Vol. 429, 623-628.

Petit et al., 1999. Climate and
 atmospheric history of the past
 420,000 years from the Vostok
 ice core, Antarctica. Nature,
 Vol. 399, 429-436



過去の気温はどうしてわかるの？



大地に残された証拠

過去の気温や海水準変動 (海面の相対的な高さ) について、氷床コアや、海底コアから得られることがわかりました。では、もっと古い時代の情報はどうやって知ることができるのでしょうか？

海水準は常に変動していますので、それにつれて海岸線も移動します。海岸線が内陸側へ移動することを海進、海側へ移動することを海退といひます。

海岸近くの堆積物は海進が進んで、海水準が高いときには堆積し、海退のあと海水準が低い時には削られます。また、海進や海退が起こっているときには特有の堆積物を残します。この海進から海退までの一連 (シーケンス) の堆積物を堆積させた、1 サイクルの海水準変動のことをシーケンス

という単位と考えます。この堆積物に含まれる化石から、シーケンスの時代を推定し、堆積物の調査から海水準変動の大きさを知ることができます。

世界中の大陸縁辺部でこのような調査を行い、海水準変動の時代と大きさをつなぎ合わせていくと、より古い時代の海水準変動、ひいてはそれを引き起こした気温の変動を知ることができます。

ここに示した例は堆積物の研究からわかった中生代白亜紀の海水準変動の様子です。恐竜が全盛時代を迎えた9000万年前には現在より海水面が250メートルも高かったと考えられています。

シーケンス層序学：
シーケンス層序学はもともと油田開発のための音波探査から始まりました。音波探査から得られる図面では、強い反射面と弱い反射面の縞模様が見られます。この縞模様を解釈するために研究されたのです。

おもての表の説明

年代：堆積物に含まれる放射性元素から求められる放射性年代（絶対年代とも呼ばれる）で、数字は百万年（Ma）単位です。
古地磁気編年：岩石に含まれる磁性鉱物によって、岩石ができるときの地磁気が記録されます。また、地磁気は時々逆転しますので、今と同じ（正磁極期）だったのか、反対（逆磁極期）だったのかを知ること、年代を絞り込むことができます。
地質時代：時間を言うときには大きい単位から「紀」、「世」、「期」、地層を言うときには同様に「系」、「統」、「階」と言います。この表では省略していますが、堆積物の年代を決めるのには有孔虫、ナノプランクトン、アンモナイトなどの示準化石も使われています。

シーケンス層序

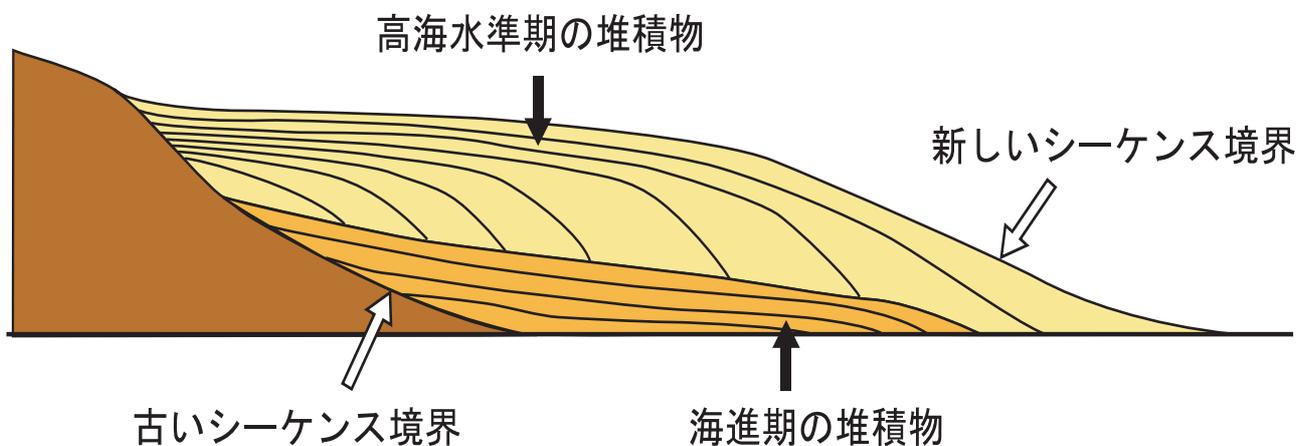
サイクルの長さ：この表では変動する周期の長さを3段階くらいに区分しています。
相対的な海岸線の変化：左へ行くほど海岸線が内陸側へ移動した（＝海が広がった）ことを示しています。逆に右へ行くほど海岸線が海側へ移動した（＝陸が広がった）ことを示しています。
海水準変動曲線：相対的な海岸線の変化から求められた海水準の変化です。短期的な凹凸の様子（赤い線）は第3オーダーと、長期的な凹凸の様子は第2オーダーと良く対応しているのがわかります。

下図の説明

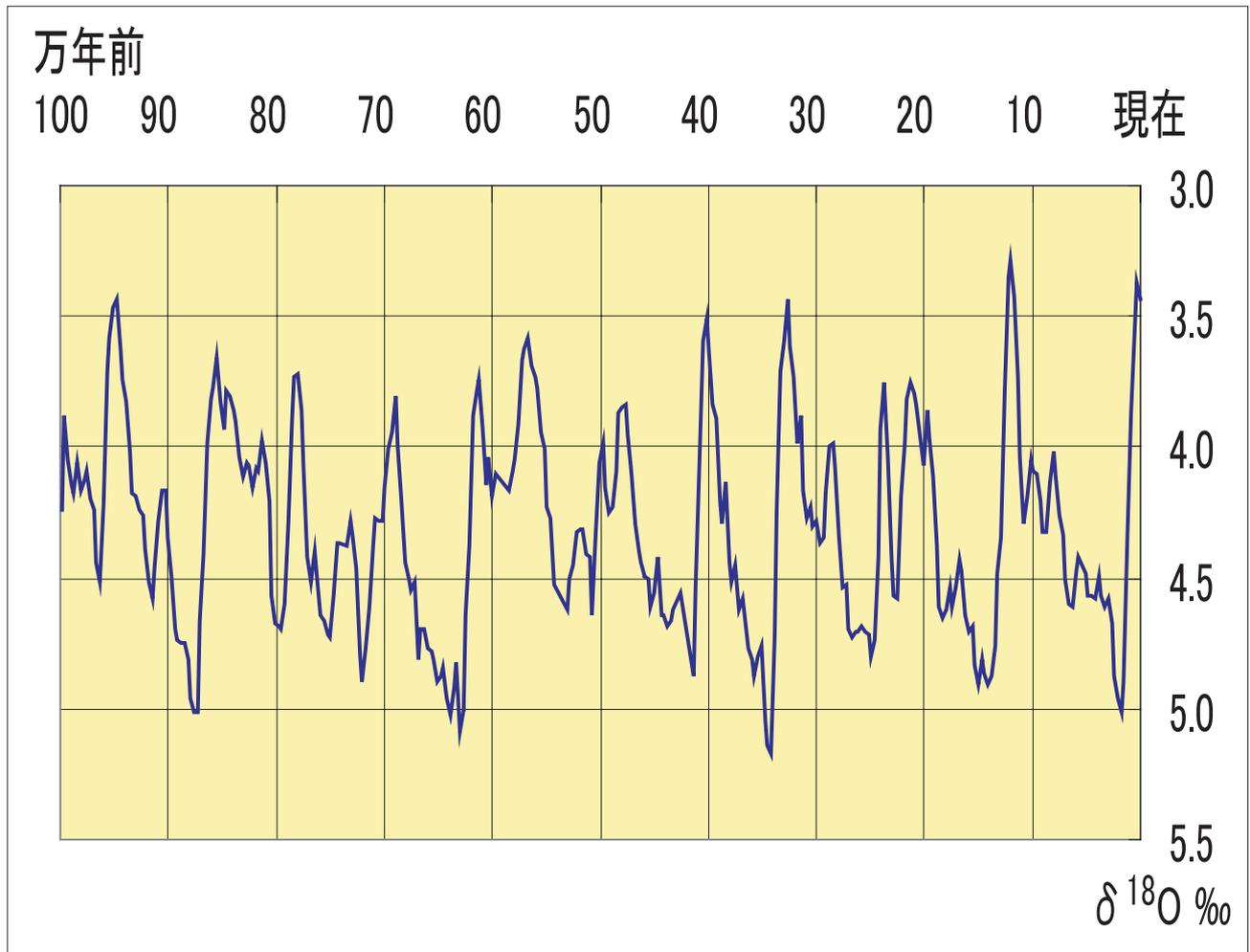
これがシーケンス層序学のもとになる、海進・海退1サイクルで堆積した地層の模式的な断面図です。

参考文献

Haq, Hardenbol & Vail, 1987. Chronology of Fluctuating Sea Levels Since the Triassic. Science, Vol. 235, 1156-1166.



酸素同位体ステージとは？



上の図は 100 万年分の海底コアの ^{18}O のデータです。これを見ると無数の山と谷があり、「15 万年くらい前の寒い時期」とか、「78 万年くらい前の暖かい時期」などといっても、どこのことを話題にしているのかわかりにくいですね。しかも、別の海底コアのデータを使っていると、年代や ^{18}O の値が一致しないこともあります。そこで暖かい間氷期に奇数番号を、寒い氷期に偶数番号を振ることにしました。

次のルールに則って、あなたも上のグラフに番号を振ってみてください。

^{18}O の値が大きく変化している幅のなかで真ん中を境として、温暖期に新しい方から奇数番号、寒冷期に偶数番号を振る。

あなたはどんな区分をしましょう。裏面のものと照らし合わせてみましょう。

温暖期の中にもちょっと寒い時期があり、寒冷期の中にもちょっと暖かい時期がありました。おもてのグラフでは細かいギザギザで表されています。このような時期にも小数点以下の番号またはアルファベットの小文字を使って固有の名前を付けて区別されています。それがワークテキスト6にあるような「5e」といった表し方で「5.5」と表すこともあります。5.1 (= 5a) は温暖期の暖かい時期、5.2 (= 5b) は温暖期の寒い時期、6.1 (= 6a) は寒冷期の中の暖かい時期、6.2 (= 6b) は寒冷期の寒い時期という具合です。

^{ひょうが}氷河時代と聞くとギュンツ、ミンデル、リス、ウルムと連想する方が多いかもしれません。せっかく覚えたのに、今はもうほとんど使われていません。

氷河時代の研究は、19世紀半ばにスイスを中心とするヨーロッパで始まり、19世紀の終わりには北アメリカで、古い方からネブラスカ、カンザス、イリノイ、ウィスコンシンの4つの氷期が区分されました。20世紀初頭にはヨーロッパでも上記の氷期が区分されました。その頃までの研究は、主に氷河性堆積物の研究によっていましたが、20世紀後半には、と、深海底堆積物や氷床のボーリングコアを使って、格段に詳しい情報が得られるようになりました。

最初に述べたように、海底コアの¹⁸Oのデータをみると無数の

山と谷があり、研究者同士でも、どこのことを話題にしているのかわからなくて不便が生じます。そこで間氷期に奇数番号を、氷期に偶数番号を振ることにしました。このように区分された時代を海洋酸素同位体ステージ (MIS: Marine Isotope Stage) と呼んでいます。ステージの境界は氷期から間氷期へ、間氷期から氷期へ¹⁸Oの値が大きく変化する中間点としています。さらに小さな頂点にはステージ番号の後に小数点以下の数またはアルファベットの小文字をつけています。MISは現在に近い方から260万年前の鮮新世中期まで100以上の番号が付けられています。

参考文献

町田ほか編著, 第四紀学, 朝倉書店

下の図には参考に古典的な氷期の名称を入れてみましたが、MISとの対応ははっきりしません。

