

4.1 万年世界の実態の解明

約 270 万年前から 100 万-90 万年前までの氷期・間氷期サイクルは、地軸の傾きの変動に由来する約 4.1 万年の周期が卓越し、海水準の変動量は約 30-80m 変動した。この期間は **4.1 万年世界 (41kyr world)** と呼ばれる (Raymo and Nisancioglu, 2003)。100 万-90 万年前から 60 万年前に氷期・間氷期サイクルの卓越周期は、4.1 万年から「約 2 万年と 10 万年」に変化し、60 万年前以降を **10 万年世界 (100kyr world)** と言う (図 1)。10 万年世界の氷期から間氷期への移行期間は 2 万年以下であるのに対して、間氷期から氷期への移行期間は 8 万年に及ぶ。氷期から間氷期への急速な移行期(退氷期)をターミネーションと呼ぶ(図 2)。

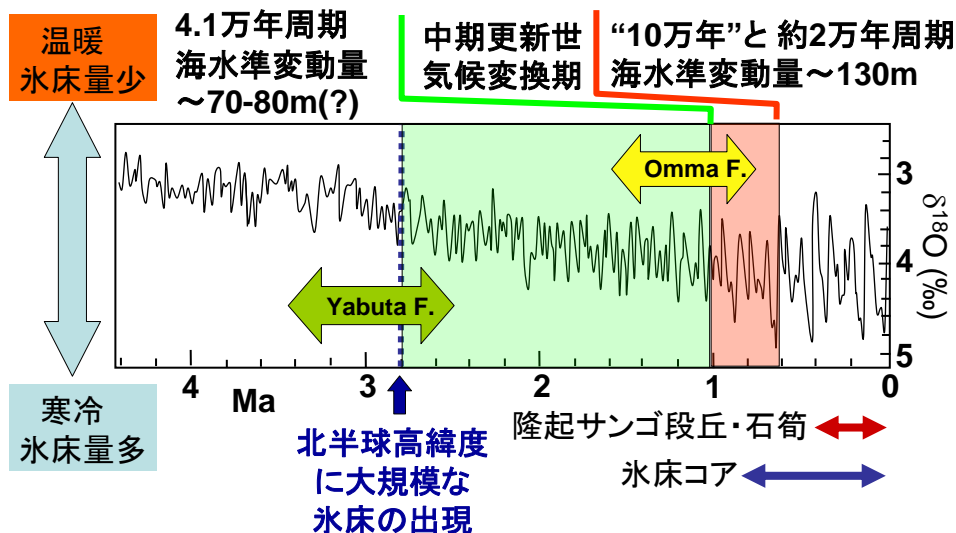


図 1 4.1 万年世界と 10 万年世界と古環境アーカイブの適用範囲。

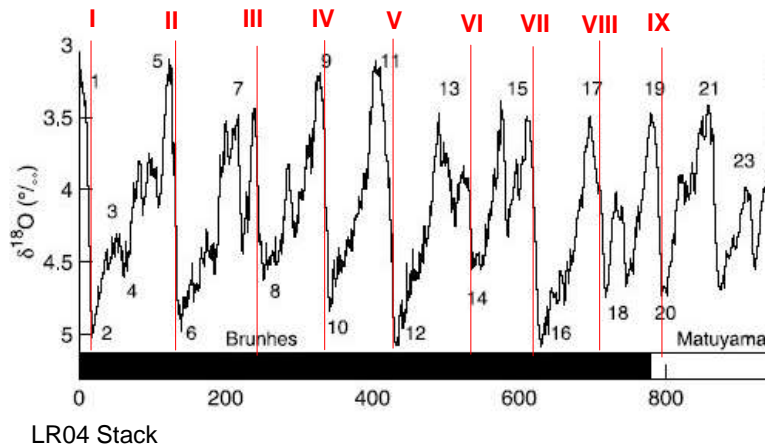


図 2 ターミネーション。新しい方から I, II, III...IX と番号がなされている。

ミランコビッチは、氷期—間氷期サイクルの原因は、地球公転の軌道要素の永年変化に伴う北半球高緯度の夏季日射量分布の周期変動にあり、増加(低下)期に間氷期(氷期)へ移行するとした(ミランコビッチ仮説)。地球公転の軌道要素の永年変化には、歳差運動に伴う約 1.9 万年と 2.3 万年の周期、地軸の傾きの変動に伴う約 4.1 万年の周期、離心率の変動に伴う約 10 万年と 40 万年の周期があるが、離心率の変動に伴う日射量変動は、歳差運動・地軸の傾きの変動に伴う変動より小さい(図 3)。したがって、ターミネーションは、離心率の変動が原因ではなく、前のターミネーションから、4 あるいは 5 回目の歳差運動による日射量変動で発生したかもしくは、2 あるいは 3 回目の地軸の傾きの変動による日射量変動で発生したと考えられている。

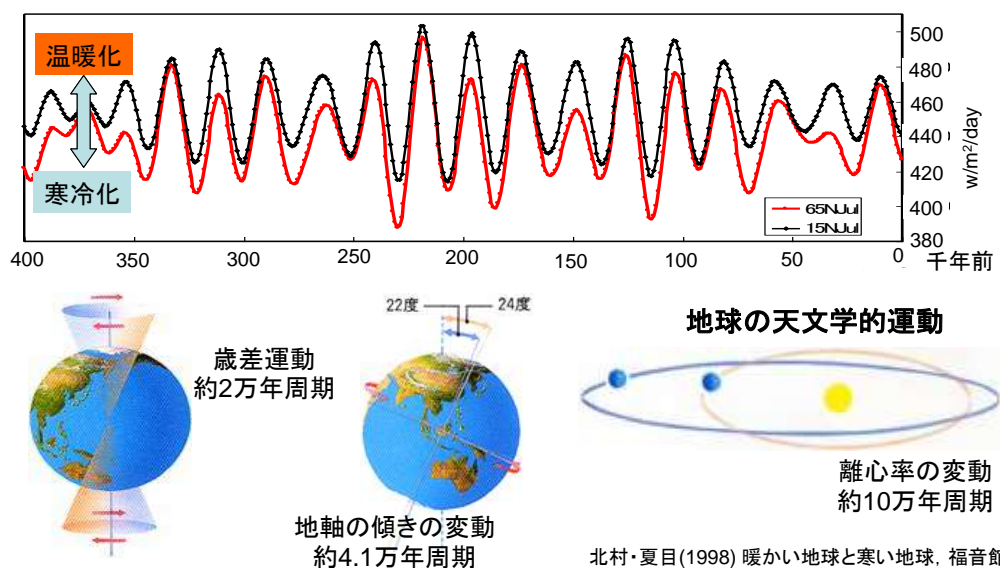


図 3 ミランコビッチサイクルとそれに伴う北半球夏季日射量の過去 40 万年間の変動。

現在の大气中の CO₂ 濃度は 380ppm で、北半球高緯度に大規模氷床の出現する直前 (2.8Ma) の濃度に匹敵する。つまり、人類はたった 100 年で大气中の CO₂ 濃度を 2.8Ma の状態に戻ってしまったわけで、その時代は **4.1 万年世界** である(図 1)。「4.1 万年世界と 10 万年世界」と CO₂ 濃度との関係は未解明だが、現在の地球気候システムは 4.1 万年世界のシステムに戻ってしまっているかもしれない。10 万年世界に比べて、4.1 万年世界の実態は良く分かっていない。これは時代を遡ると、¹⁴C 年代測定や U-Th 年代測定の適用範囲から外れ、また氷床コアの記録も 80 万年前以降のものしかないからである。そこで私は、4.1 万年世界の環境変動を明らかにするために、下部更新統の ^{おんま}大桑層(石川県金沢市に分布)の地質記録と化石記録から古環境解析を精力的に行った。

大桑層を調査対象に選択した理由は、(1)氷期—間氷期サイクルを検出しやすい中緯度に位置すること(図 4)、(2)高山ほか(1988)のナンノ化石層序の検討から堆積年代が判明していたこと(図 5)、(3)浅海生の貝化石を多産すること、である。

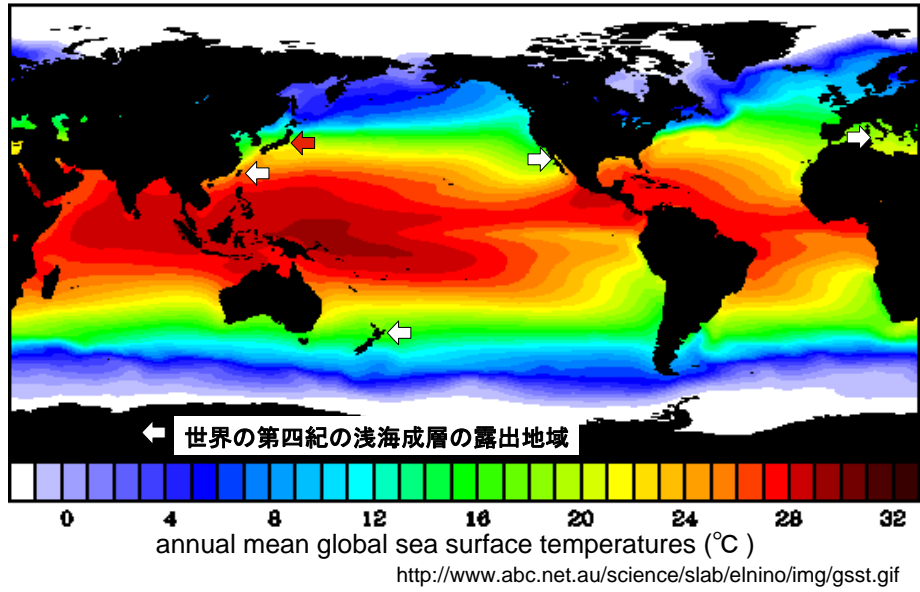


図4 世界の表層海水の年平均水温。日本列島周辺海域は温度勾配が大きく、世界で最も気候変動を読み取りやすい場所である (Beu and Kitamura, 1998).

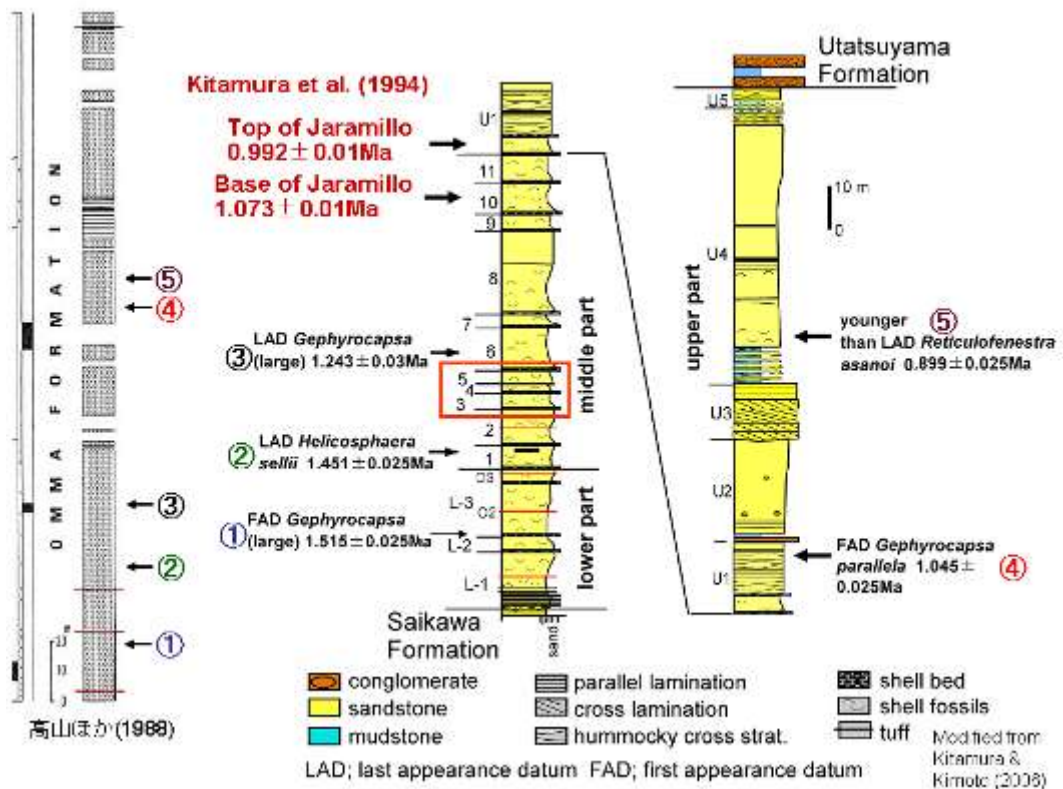


図5 大桑層模式露頭のナンノ化石層序・古地磁気層序。

下部更新統の大桑層(石川県金沢市)から産する貝化石群は、大桑一万願寺動物群の模式で、私の調査前は、層厚では5%程度の貝化石密集層(平均層厚約0.7m)の構成種から、同層の堆積期間は永続的に寒流下にあったとされていた(図6)。

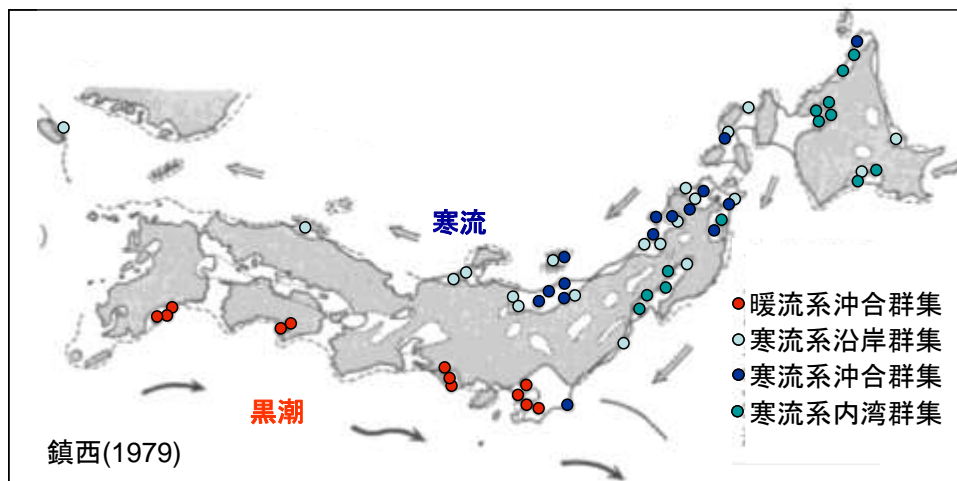


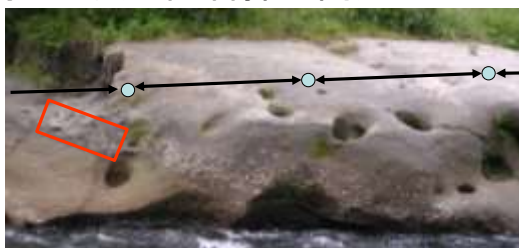
図6 1980年代の前期更新世の海洋生物分布の復元。

私は、大桑層の模式露頭(金沢市大桑の犀川河床)において、堆積相解析を行うとともに全層準(合計約200m)の貝化石の層位をこれまでに無い精度で定量的に調査した。その方法は図7,8の通りである。また、浅海環境の代替指標としての貝化石のメリットを図10に示した。また、露頭欠損部はボーリング掘削によって充填した。そして貝化石の層位データを基に、浮遊性有孔虫の群集解析を行った。これらのデータをシーケンス層序学的に解析した。

野外調査方法—試料採取問題—

従来の試料採取方法
 貝化石: 密集層重視
 微化石: 等間隔採取

↓
 貝化石データ: 偏り
 微化石データ: 確率的



本研究の試料採取方法
 貝化石: 連続解析
 微化石: 貝化石データをもとに決定

↓
氷期—間氷期
サイクルの検出が可能

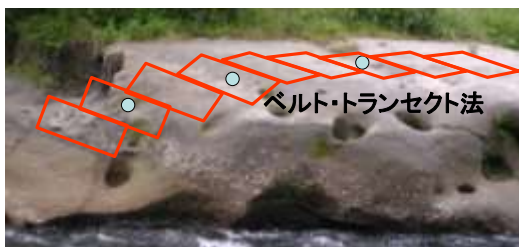


図7 4.1万年世界の氷期—間氷期サイクルの環境変動を解析するための化石記録の調査方法。

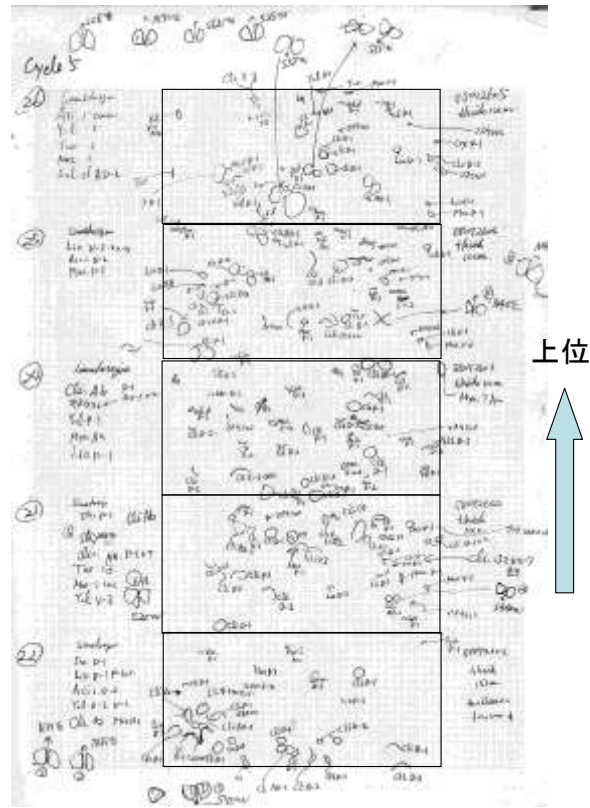


図8 貝化石の層位のデータ.

浅海環境の代替指標としての貝化石のメリット

- ・分散速度(プランクトン栄養型幼生)が速い.
- ・浅海成堆積物から多産.
- ・現世種については多数の生態情報あり.
- ・**現地性産状の識別可能**→
時間的平均化の評価



図9 浅海環境の代替指標としての貝化石のメリット.

調査の結果(北村・近藤, 1990; Kitamura et al., 1994; Kitamura, 1998, Kondo et

al., 1998; Kitamura and Kimoto, 2006 など), 同層は 19 の堆積シーケンスの累重からなり, 堆積シーケンスは 4.1 万年周期の氷河性海水準変動に起因し, 海洋酸素同位体 (MIS) ステージ 56 から 21.3 に対比される (165-85 万年前) ことが判明した (図 10, 11, 12). 典型的な堆積シーケンスは層厚が約 7m で, 下位より貝化石密集層, 淘汰の良い細粒砂岩, 泥質細粒~極細粒砂岩, 淘汰の良い細粒砂岩の順に重なる. 密集層の基底はラビンメント面で, シーケンス境界, 海進面でもある. 1つの堆積シーケンスでは寒水系種を主体とする貝化石群集から, 暖水系種を主体とする貝化石群集へと変遷し, そして再び寒水系種を主体とする貝化石群集が現れる (図 12).

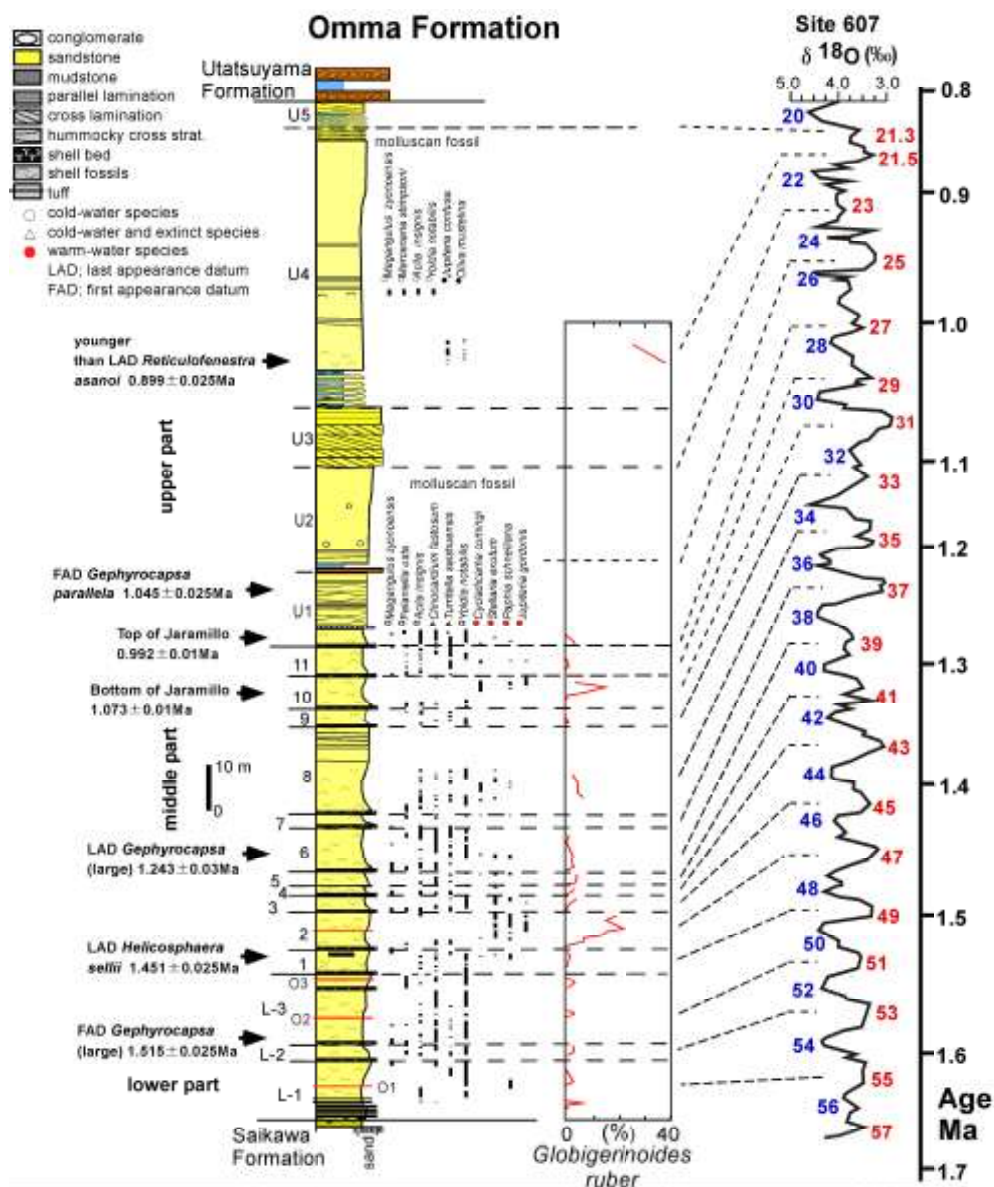


図 10 大桑層模式露頭の堆積シーケンスと海洋酸素同位体ステージの対比. および主要な貝化石種と暖水系浮遊性有孔虫 *Globigerinoides ruber* の層位分布.

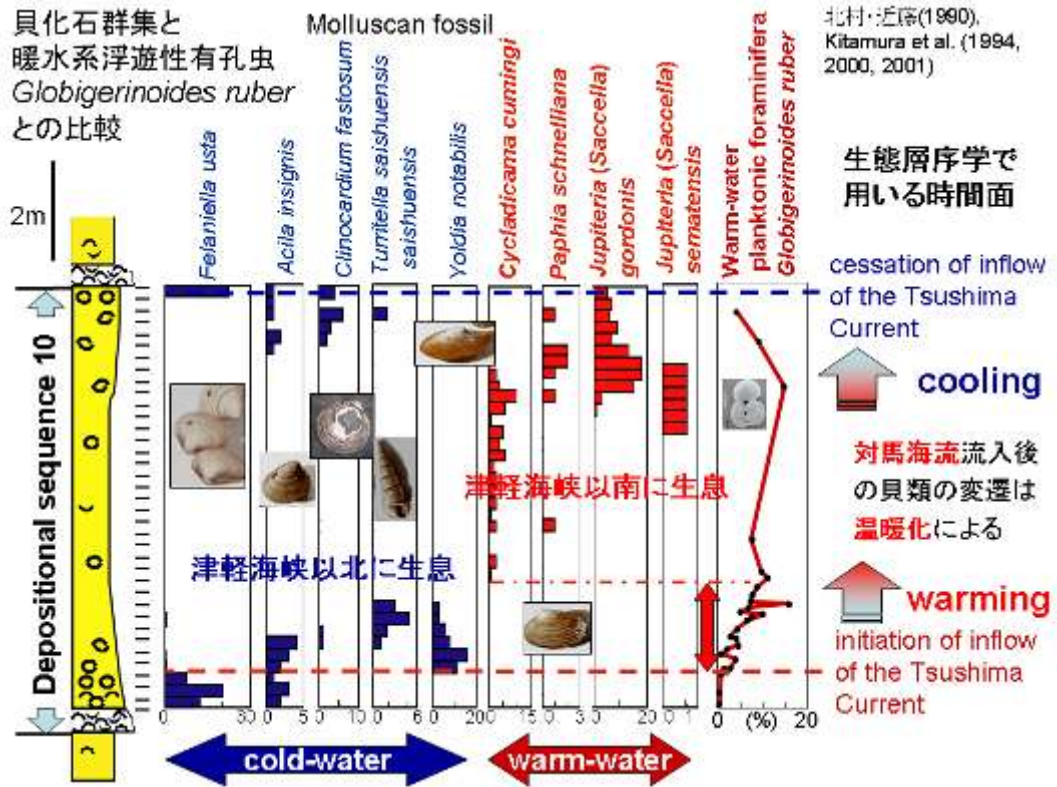


図 11 堆積シーケンス内の主要な貝化石種と暖水系浮遊性有孔虫 *Globigerinoides ruber* の層位分布と古環境復元.



図 12 大桑層中部の堆積シーケンスと貝化石密集層

これらのことから、当時の日本海の浅海環境は 4.1 万年周期の氷期—間氷期サイクルに連動してダイナミックに変動したこと、貝化石密集層は退氷期の海水準上昇に伴う外浜侵食で形成されたこと、を解明した。また、4.1 万年世界の汎世界的海水準変動の変動量は最大 50m と見積もった。その一方で、大桑層の貝化石や浮遊性有孔虫の化石殻は続成作用を被っているため、地球化学的分析を適用できないことが分かった。

4.1 万年周期の氷期—間氷期サイクルについては、Huybers (2006)は**北緯 65 度の夏季エネルギー(氷点 0°Cを超える期間の総日射量)に対するカオス的応答**という考えを提唱している (Huybers, 2009) (図 13)。夏のある 1 日の日射量変動は歳差運動の影響を強く受けるのだが、氷点 0°Cを超える期間の総日射量の変動は地軸の傾きの影響を強く受ける。つまり、4.1 万年周期が卓越する。さらに、Huybers (2009)は 4.1 万年世界の氷期—間氷期サイクルは、しばしば氷期(間氷期)になるタイミングにも関わらず氷期(間氷期)にならなかった時代(スキップ)があることや氷床量変動の時間変化の軌跡が strange attractor (奇妙なストレンジアトラクター)を描くことからカオス的に応答しているとしたのである。スキップした時代としては、MIS 35 が典型的であり、これは Shackleton et al. (1990)が 2つの地軸の傾きのサイクルからなるとした同位体ステージである。実際、大桑層の堆積シーケンスと化石群集の変遷も Shackleton et al. (1990)の考えを支持し、すなわち MIS 35 に対応する堆積シーケンスの層厚は上下の堆積シーケンスの 2 倍である (Kitamura and Kimoto, 2006)。

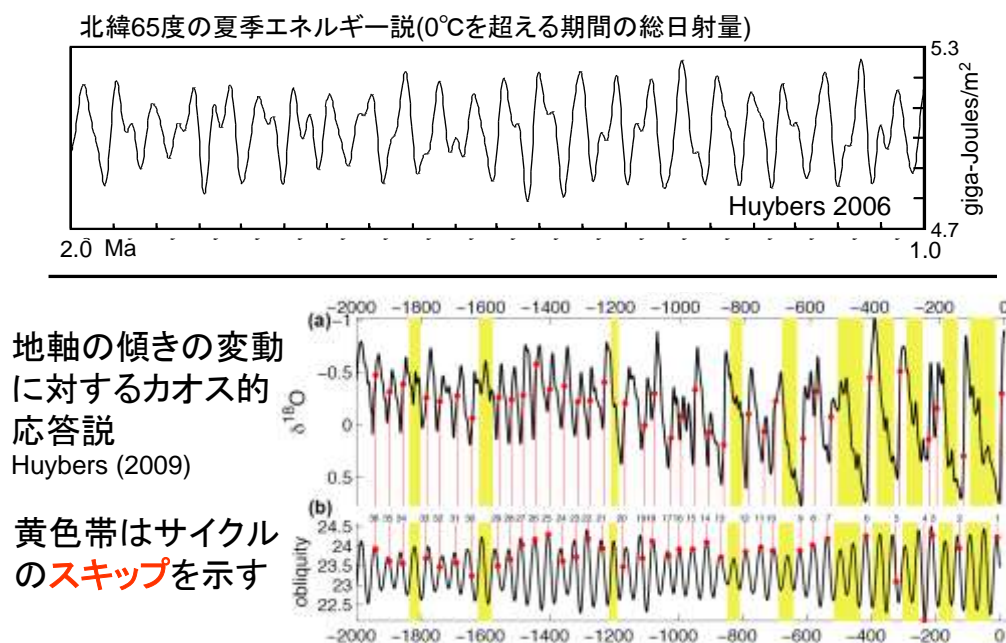


図 13 Huybers の氷期—間氷期サイクルの発生機構。

氷期-間氷期サイクルが、北半球高緯度の夏季日射変動に対するカオス的応答であるということは当然なことである。なぜならば、氷期-間氷期サイクルは、地球表層から地殻と上部マントルに及ぶ多数の独立した気候システムの反応と相互作用の結果であるからであり、つまり複雑系だからだ。したがって、4.1 万年世界の氷期-間氷期サイクルの理解には、各気候システムの時間変動を高精度で復元することにある。その際に重要な情報は氷床量変動である。過去 50 万年間の海水準変動は、有孔虫の酸素同位体比記録とサンゴ礁からの海水準変動データとの結合により高精度で復元できる。だが、それ以前の復元には、(1)有孔虫の酸素同位体比と Mg/Ca 比(水温推定)との比較から復元した海水の酸素同位体比の変動に基づく方法(図 14)、(2)浅海成層の堆積シーケンス堆積相解析に基づく方法がある。

大桑層は 1.65~0.8 Ma の酸素同位体ステージと堆積シーケンスとの対比に成功した世界唯一の陸上セクションであり、今後は堆積相から相対的海水準変動を復元し、世界各地の酸素同位体比記録の中で汎世界的海水準変動を最も忠実に反映している記録を決定する予定である。

- **LR04 stack** Lisiecki & Raymo (2005) 57地点の酸素同位体データをスタックしたカーブ(引用件数422) **地域的海水温変動の影響を除去できない。**
- Sosdian & Rosenthal (2009) 北大西洋深海底有孔虫のMg/Ca比(水温推定)と $\delta^{18}\text{O}$ から復元。Yu & Broecker(2009)から氷期-間氷期の CO_3^{2-} の変化の影響を考慮していないと指摘。

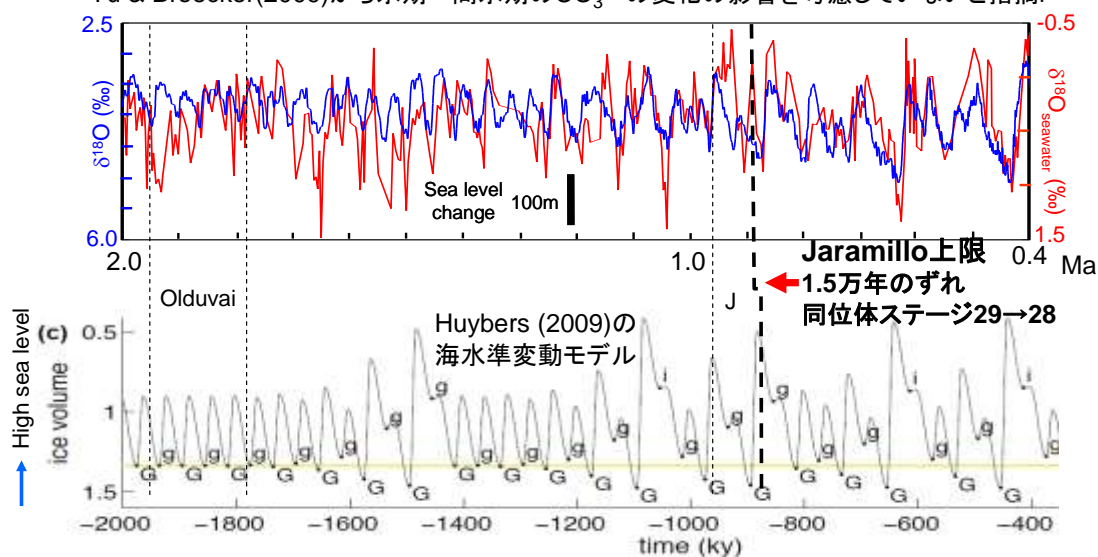


図 14 4.1 万年世界の氷河性海水準変動。