

深海から探る地球ダイナミクス —恐竜の絶滅からタイタニックまで—



秋田大学国際資源学部 学部長 佐藤 時幸

1. はじめに

地球史を紐解くには、様々な地球科学的手法がある。ここで述べる深海底堆積物に焦点を当てる研究手法は、1960年代後半に米国によって開始された。

深海底堆積物が注目されたのにはいくつかの理由がある。その一つが、海洋底には過去から現在までの堆積物が順序よく欠損なしに堆積していることである。すなわち、その堆積物を cm 単位で調査すると、過去から現在までの環境変動を数百年～千年単位で解析出来ることを示す。さらに堆積物には化学的・物理的变化が記録されているほか、当時生息していた微小生物の遺骸も含まれており、その解析は海洋環境変遷史を詳細に紐解くことが出来ることを示唆している。ここでは、深海堆積物の調査から何が明らかになってきたかについて、恐竜とタイタニック号を例に概要を紹介する。

積物は常に同じ岩相であるはずだが、北大西洋の過去 200 万年間の堆積物は、色調、含有構成物ともに様々な変化を呈し、様々な環境変動があったことを示している。同様な変化は多くの海域の堆積物でも記録されており、そのスケールは細かいもので mm 以下、大きいものは 10m 以上の周期で認められ、地球の環境変動が頻繁にあったことを示唆している。

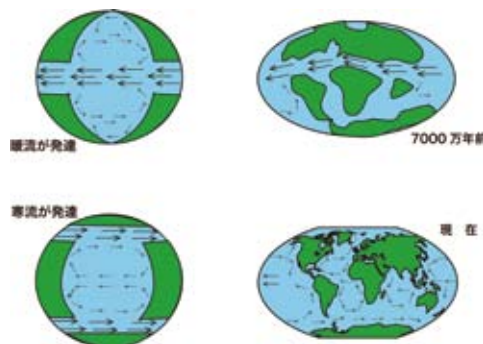


図1 大陸配置の違いによる海流表層循環の差異

2. 海洋循環と深海底堆積物

地球の環境は、大気、陸、海の相互関係に左右され大きく変動する。とくに暖流や寒流などの流路の変動は、地球全体の熱塩循環に影響するため、その解明は重要な要因の一つである。例えば、図1に示した約 7000 万年前の大陸の配置と現在のものとでは、海洋分布に大きな違いがある。すなわち、比熱の大きな海水が太陽からの熱を低緯度で受けとり、大きな暖流となって循環する 7000 万年前と、寒流が発達し低緯度の暖流が各大陸で遮断されて海水が暖まらないまま循環する現在との違いを示しており、7000 万年前の地球が、現在の地球よりはるかに暖かい環境であったことを示す。2004 年に実施された統合国際深海掘削計画（以下 IODP）Exp 303 では、このような熱塩循環の変化と気候変動サイクルとの関係解明を目的に北大西洋の深海底堆積物の調査を行った。もし、海洋環境変動が無ければ堆

2.1. 恐竜絶滅—隕石は衝突したか？—

約 6500 万年前の恐竜絶滅が隕石衝突によるものであるという説が出されたのは 1980 年のことである (Alvarez et al., 1980)。この説は、イタリア、グビオの白亜系／古第三系境界にイリジウムが濃集することから指摘されたもので、この説には大きな議論が巻き起こった。その後、ユカタン半島に隕石衝突地点があるという説に基づいて、国際深海掘削計画 ODP Leg 171B (図 8) ではチャールストン沖で白亜系／古第三系境界までを掘削した。その結果、同境界に衝撃石英の密集層、イリジウムの濃集層が発見され、白亜紀末の隕石衝突は間違いのないものであることが証明された (Shipboard Scientific Party, 1998)。

一方で、このコアでは、白亜系／古第三系境界直上の試料から *Braarudosphaera bigelowii* と呼ばれる五角形の特異な石灰質ナノ化石 (図 3) のみが産出し、それよ

り上位では白亜紀を特徴付ける石灰質ナノ化石が産しない。このような群集変化は、ヨーロッパの陸上セクションはもちろん、各地の深海底コアでも認められる。この種の多産が塩分濃度の低い海水を示唆することからすると、隕石衝突によって海洋の塩分濃度が汎世界的に大きく変化したであろう事が推測されるが、詳細は未だ不明である。



図2 イタリア・グビオの白亜系／古第三系境界（黄色の看板がある層）の岩相変化（コインのある黒色部がイリジウムの濃集層）

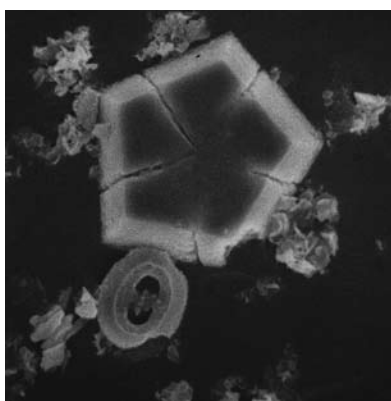


図3 白亜紀／古第三紀境界の隕石衝突直後に多産する *Braarudosphaera bigelowii* (五角形の種)

2.2. 微化石層序の驚くべき精度と第四紀型気候の成立

Takayama and Sato (1987) が過去 200 万年間に 12 の石灰質ナノ化石対比基準面を指摘して以来、石灰質ナノ化石の対比精度に注目した研究は大きく進展した。図 4 は過去 400 万年間に認められる石灰質ナ

ノ化石基準面と、地球が経験してきたグローバルイベント、および酸素同位体層序との関係を示している（佐藤ら, 2012）。一般にこのような微化石対比基準面は、その精度が必ずしも明確にされていないが、この石灰質ナノ化石調査では、調査間隔が酸素同位体層序と同様に cm 単位で進められ、その精度が明確に指摘されている（佐藤ら, 2012）。すなわち、図 4 に示した基準面 2 と 3 と酸素同位体層序との位置関係は、遠く離れた北大西洋と太平洋いずれにおいても全く同様で、基準面 2、3 はいずれの海域でも酸素同位体層序の MIS 8 と 12 に位置する。しかも驚くべき事に基準面 2 と 3 の詳細な位置を見ると（図 5）、それらは、いずれも同位体ステージの最大値（ピーク）の直前にあり、石灰質ナノ化石基準面が極めて高い同時性を有する事を示す。

このような同時性に基づく調査から、地球上で発生した環境変動「グローバルイベント」が認識されるようになった（図 4）。例えば 275 万年前の「Climate Crash（Bartoli et al., 2005）」は、大西洋から太平洋へ流入していた巨大暖流がパナマ地峡の成立に伴って分断されて小規模化し、地球は一挙に寒冷化へ向かった事件（Sato, et al., 2004）を指す。この暖流の分断は、パナマ地峡で分断された暖流が大西洋を北上し、水分を北極圏へ供給、これが暖流分断による寒冷化と相まって北極域の急激な氷床拡大をもたらした。この結果、地球の急激な寒冷化とともに、北極海を含めた現在の海流システムが完成する（Quaternary Style Climate (Sarnthein et al., 2009) の確立；図 4）。近年、新第三紀と第四紀の境界がカラブリアン基底からジェラシアン基底に変更されたのは、このような第四紀型気候に変化したのがパナマ地峡の成立時期、すなわち、ジェラシアン／ピアゼンチアン境界付近であった事による。

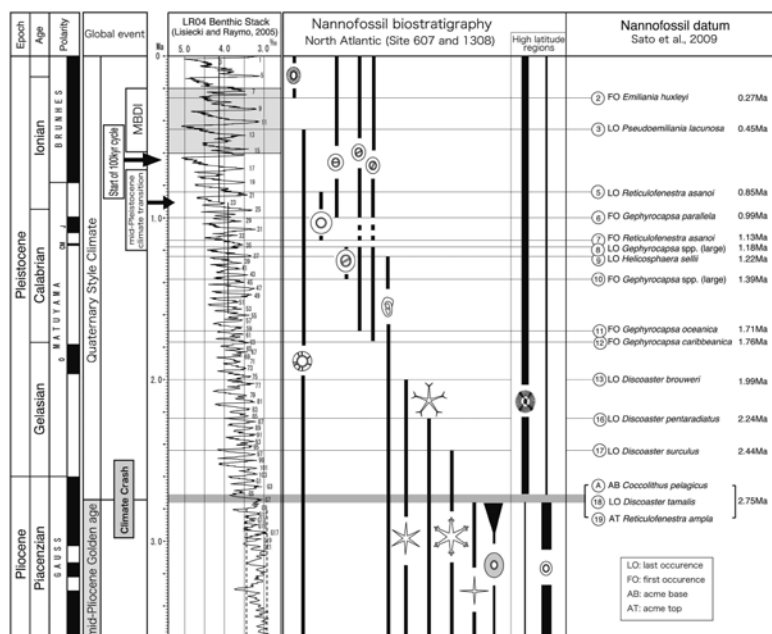


図4 現在から過去360万年前までに認められる石灰質ナノ化石対比基準面、および酸素同位体層序、地磁気層序、汎世界的に記録されているグローバルイベントとの関係および基準面の年代値(佐藤ら, 2012)

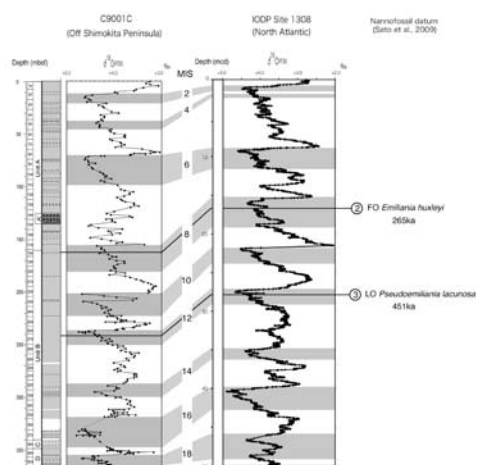


図5 北大西洋と西太平洋で確認された石灰質ナノ化石対比基準面2, 3と酸素同位体ステージとの層位関係

3. 深海から探る石油資源の形成環境

石油鉱床の形成には様々な要件があるが、中でも石油根拠岩の形成には、(1) 有機物の高生産、(2) 有機物の堆積物中の濃集と保存が重要である。

3.1. プランクトンの生産量

日本海側の油田群における石油根拠岩は、植物性プランクトン(特に珪藻)の生産量とその形成に密接に関係している。一般にプランクトンの生産性は海洋構造が重要で、表層に栄養塩が供給される環境にあったかが問題となる。

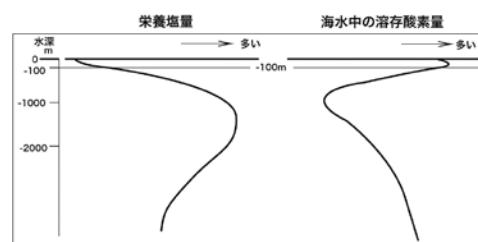


図6 海洋の表層から深層にかけての溶存酸素量と栄養塩量の変化モデル

図6は、現在の海洋断面を示しており、表層では溶存酸素量が多く貧栄養であるのに対し、水深100m以深では栄養塩が増加する。珪藻のような植物プランクトン

は光合成を行うため、多くの個体は水深100m以浅に生息する。したがって、海洋表層が安定した海域では海洋表層の栄養塩が少ない為に生産性が低い。しかし、湧昇流などによって貧栄養な表層水が他方へ移動し、深層から栄養豊富な海水が海洋表層に上昇する海域では、栄養塩の増加によって植物プランクトンの生産量が極めて多くなる。図7は銚子海域の例であるが、房総半島沿いに北東へ向かう黒潮は、銚子の沖合で東に向きを変え、太平洋を東進する。この時、銚子の北から茨城にかけての海洋表層水は黒潮の東進により引きずられ東へ移動する。移動した表層水を補う為に深層の栄養塩を含む海水が上昇し、銚子沖一帯は栄養豊富な海域となり、プランクトンの生産量も高い。銚子海域が良好な漁場になっているのにはこのような背景があり、一方で、このような湧昇流発生が石油根源岩生成の要因ともなる。

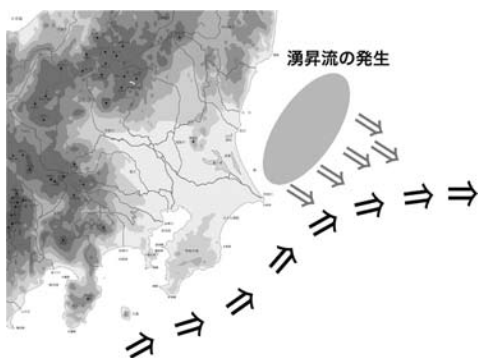


図7 銚子沖合における湧昇流の発生

3.2. 有機物の保存—タイタニック号は北へ向かったのか?—

一般に海洋表層の海水は大気と接触している為に溶存酸素量が多い。通常であれば、深海にいくに従って酸素は消費され溶存酸素量は深度とともに少なくなる。このような海洋環境は、白亜紀に発達していた。しかし、現在の海洋は、図6に示したように深

度1000m以深になると再び溶存酸素量が増加する特徴を持つ。

(1) タイタニックはどこへ向かったのか

映画にあるように、タイタニック号は穏やかな天候の中サウスンプトンを出航し、ニューヨークへと向かった。しかし、時間の経過とともに気温は低下し、出航から4日後の夜半に冰山と衝突し沈没する。気温の変化からするとタイタニック号はまるで北の海域へ向かったかのように思える。実際には図8のように、相対的には南方向、正確には西南西へと向かいカナダのセントジョーンズ沖で冰山と衝突した。ではなぜ大西洋は東が暖かく西側が寒いのだろうか?

(2) 底層流の形成

大西洋の特異な海洋システムの原因は、グリーンランド沖での底層流の形成が原因にある。大西洋高緯度海域、特にグリーンランドの沖合では、海水が形成されるが、その際の氷の形成では水分のみが氷に取り込まれ、余分な塩分は放出される。このため、海水の周りには冷たくて塩分が濃く、かつ酸素を十分に含んだ重たい海水が形成される。ブラインと呼ばれるこの海水は、その重さからグリーンランドの東方沖の2カ所(図8のXで示した地点)と北極海で深層に沈み込み、南極ウエッデル海からのものと合流して世界の海底を流れる。この底層流は一部がインド洋で表層に上昇、残りは太平洋北部のアリューシャン海域で表層へ上昇し、北大西洋へと戻る。この海洋循環の一周に要する期間は2000年とも3000年とも言われている。北大西洋で暖流が北上するのは、グリーンランド沖で深海へ沈み込んだ海水を補う為であり、暖流はイギリス沿いを北上、熱をヨーロッパに供給する。そのうち一部はグリーンランド方向へ向かい、残りはスピッツベルゲンを経由して北極海へと流れ込む。



図8 北大西洋～北極海域の海洋循環システムとタイタニック号の出航位置(サウサンプトン)と到着予定位置(ニューヨーク)。Xは表層水の深海への沈み込み位置を示す。

一方で北大西洋西部は、北極からの寒流が南下するため、同じ緯度のイギリスとカナダのセントジョーンズとは全く異なった気候を有することになる。タイタニック号の悲劇は、このような大西洋特有の海洋循環がもたらしたとも言えるであろう。

(3) 石油根源岩生成のための有機物の保存

さて、このような深層流の存在は深層に酸素を供給し、深部での溶存酸素量の増加を招く(図6)。白亜紀は極に氷床が無かったため、深層流が存在せず、海洋の深部は貧酸素～無酸素状態であったと推定され、石油根源岩の生成に適した海洋環境であった。しかし、現在の海洋での深層流の存在は、深層流によって供給される酸素が海底に堆積した有機物を分解させるため、石油

根源岩の形成に適さない。

しかしながら、秋田に分布するラミナを持った女川層の硬質泥岩は極めて優秀な石油根源岩であるが、その形成は、秋田の石油堆積盆地に深層流が流入しなかった事を示している。すなわち、堆積盆地の出入り口に深層流の流入を防ぐ海底の高まり(シル)があるシルドベーズンであったと考えられている。

4. おわりに

ここでは、DSDP-ODP-IODPといった深海底堆積物の調査からこれまで明らかになった地球科学的事象について紹介した。このような事象の解明には、層序学の対比精度の飛躍的発展が大きく寄与した。このような精度の高い時間対比は、今後さらに地球のダイナミクスのみならず様々な地球科学

.....

的事象を極めて具体的に、かつ体系立てて説明可能となると考える。

発表の機会を与えていただいた一般社団法人 全国地質調査業協会連合会、東北地質調査業協会、および全地連「技術フォーラム 2014」秋田 実行委員会の皆様に御礼申し上げます。

5. 文献

Alvarez, L. A., Alvarez, W., Asaro, F., and Michel, H. V. (1980): Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 208, 1095-1108.

Bartoli, G., Sarnthein, M., Weinelt, M., Erlenkeuser, H., Garbe-Schonberg, D., and Lea, D. W. (2005): Final closure of Panama and onset of northern hemisphere glaciation. *Earth Planet Sci. Lett.*, 237, 33-44.

Sarnthein, M., Bartoli, G., Prange, M., Schmittner, A., Sarnthein, B., Weinelt, M., Anderson, N. and Garbe-Schonberg, D. (2009): Mid-Pliocene shifts in ocean overturning circulation and the onset of Quaternary-style climate. *Clim. Past*, 5, 269-283.

Shipboard Scientific Party (1998): *Proceedings of the Ocean Drilling Project*, 171B.

佐藤時幸・千代延俊・ファリーダ メウティア (2012) : グローバル気候変動と新第三紀の終わり／第四紀の始まり—石灰質ナンノ化石層序から—, *地質学雑誌*, 118, 87-96.

Sato, T., Yuguchi, S., Takayama, T., and Kameo, K. (2004) : Drastic change of the geographical distribution of the cold water nannofossil *Coccolithus pelagicus* (Wallich) Schiller during the late Pliocene—with special reference to increase of ice sheet in the Arctic

Ocean-, *Marine Micropaleontology*, 52, 181-193.

Takayama, T. and Sato, T. (1987) : Coccolith biostratigraphy of the north Atlantic Ocean, Deep Sea Drilling Project Leg 94. In Ruddiman, W.F., Kidd, R.B., Thomas, E., et al., *Init. Repts. DSDP*, 94 (Pt. 2). Washington (U.S. Govt. Printing Office), 651-702.