

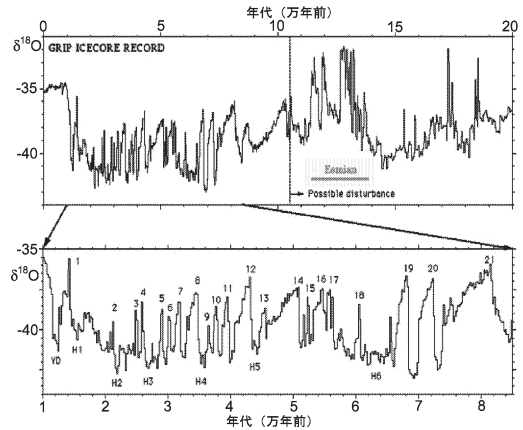
4. アジアモンスーンの変動とダンスガード・オシュガーサイクル

多田隆治*・横山祐典*・長島佳菜*・木戸芳樹*

1. はじめに

筆者が参加し、1989年夏に行なわれた国際深海掘削計画 (ODP) 日本海航海では、日本海深部の4地点において掘削を行なったが、全ての掘削地点において、数cm~数10cmで繰り返される明灰色と黒灰色のリズミカルな互層が海底面から100m以上にわたって回収された。これらの明暗互層は、日本海深部全域で同時に堆積したもので、日本海が、過去100万年間以上の間、1つのシステムとして何らかの古気候・古海洋変動に応答して、その環境を変化させた事を示すと考えられた (Tada *et al.*, 1992)。しかし、各々の明色層、暗色層が表す期間は、数百~数千年程度と、当時から知られていた氷期・間氷期サイクルなどの環境変動周期よりも1桁以上短く、それがどのような古気候・古海洋変動を反映しているのかは謎であった。

この日本海に堆積した明暗互層の研究が進んでいたところ、グリーンランド氷床頂部に掘削された氷床コアの酸素同位体比の分析結果が公表された (Dansgaard *et al.*, 1993; Taylor *et al.*, 1993)。氷床は、降雪が埋没過程で圧密を受けて氷となったもので、その酸素同位体比は、降雪時の気温を反映する。公表された結果は、驚くべきものだった。即ち、今から7万年前から2万年前にかけての最終氷期において、数百年から数千年継続する温暖期 (亜間氷期と呼ばれる) と寒冷期 (亜氷期と呼ばれる) の20回に及ぶ繰り返しの存在が明らかにされたのである (第1図)。更に着目すべきは、亜氷期から亜間氷期への変化の温度幅が10度以上に及び、それに要する期間も、数年から数十年と極めて短かった点である (Dansgaard *et al.*, 1993)。この変動は、突然かつ大規模な気候変動として注目を浴



第1図 (上) グリーンランド氷床コア (GRIP) から得られた過去20万年間の水の酸素同位体比変動記録。(下) DOCが明瞭に見られた8.6~1万年前の拡大図。酸素同位体比は、積雪時の気温を反映し、同位体比が重い時期 (上向きのピーク) が温暖期に対応する。Dansgaard *et al.* (1993) に基づく。

び、その発見者にちなんで、ダンスガード・オシュガーサイクル (以下ではDOCと呼ぶ) と呼ばれた。筆者らが、DOCと日本海堆積物に見られる明暗互層の関係に気づくまでに、それほど長い時間はかからなかった。

2. DOCと日本海堆積物の明暗縞

ODP日本海掘削が終わって間もない頃、可視領域の反射スペクトルを簡便迅速に計測できるポータブルな色測計が発売され、筆者らは、早速その堆積物への応用を試みた。日本海深部からピストンコアで採取された堆積物の色を連続的に測定し、その深度方向の変化を調べた所、その (特にL*と呼ばれる明るさの指

* 東京大学大学院理学系研究科。

© 2007 日本気象学会

標の) 深度方向の変動パターンが、グリーンランド氷床コアの酸素同位体の変動パターンとよく似ている事に気づいた。そこで、日本海堆積物について、 ^{14}C や火山灰などを用いて詳しく年代を調べて時系列データ化し、グリーンランド氷床コアの酸素同位体比と比較したところ、両者の変動パターンは、年代測定誤差の範囲内で一致し、亜氷期と呼ばれる温暖期に暗色層が、氷期と呼ばれる寒冷期に明色層が堆積していた事が明らかになった(第2図)。即ち、最終氷期のグリーンランドにおいて、DOCと呼ばれる急激な気温変動を引き起こした現象が、何らかの過程を経て日本海堆積物の色の変化を引き起こしたと考えられる。

そもそも、日本海堆積物の色の明るさ、もしくは暗さは、何を反映しているのだろうか？ 一般に、泥質堆積物の暗さは、有機物の含有量を反映している事が多いが、日本海堆積物も例外ではなく、その L^* と有機炭素含有量の間には、明瞭な正相関が見られた。実際に、有機炭素量分析を行うと、明色層の有機炭素含有量は、0.5~1%程度であるのに対し、暗色層では1.5~5%にも及ぶ。過去数万年間に堆積した日本海堆積物中の有機物は、その組成分析から、その主体が海洋性プランクトン起源であると考えられる。従って、日本海表層におけるプランクトン生産量の変動が、DOCに連動して変動していた事になる。では、

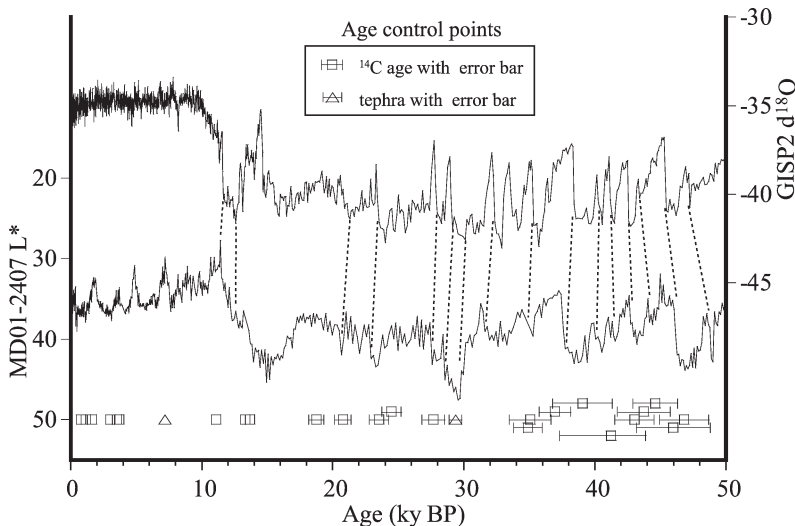
日本海表層における生物生産は、何に規定されているのだろうか？

3. 日本海におけるリン収支と東アジア夏季モンスーン

海洋表層における生物生産は、リンや窒素などの栄養塩の供給量により規定される。このうち、窒素は、窒素固定により大気から取り込む事が可能であるが、リンは、大気から取り込む事が出来ないため、数年より長いタイムスケールでは、生物生産を制限する元素であると考えられている。海洋表層へのリンの供給過程としては、リンをたくさん溶かし込んだ深層水の湧昇、河川からの供給、風成塵からの溶出などがあるが、現在の日本海におけるリンの循環を調べると、表層における生物生産に消費されるリンの半分強が対馬暖流により、残りの半分弱が湧昇により供給されており、それ以外の供給源は無視できるほど小さい。従って、湧昇の強さと、対馬暖流によるリンの供給が、表層における生物生産の主制御要因と考えられる。しかし、日本海は閉鎖された海洋であり、そこにおけるリンの滞留時間は90年足らずに過ぎない。その為、湧昇が強まっただけでは、100年を超える期間に渡って表層における生物生産を高いレベルに保ち続ける事は出来ない。一方、日本海堆積物中の暗色層の堆積期間

は、数百年から数千年継続しているのだから、それを支えるには、対馬暖流により日本海の外からリンが供給される事が必要である。

DOCの亜氷期における日本海では、氷期の2~5倍の速度で有機物が堆積している。従って、氷期には、氷期の2倍以上のリンが対馬暖流によって日本海にもたらされたものと想像される。では、DOCの氷期に、何故日本海へ流入するリンの量が2倍以上増えたのだろうか？ 日本海に流入する対馬暖流は、黒潮分岐流に起源を発するが、東シナ海沿岸水も少なからず寄与して



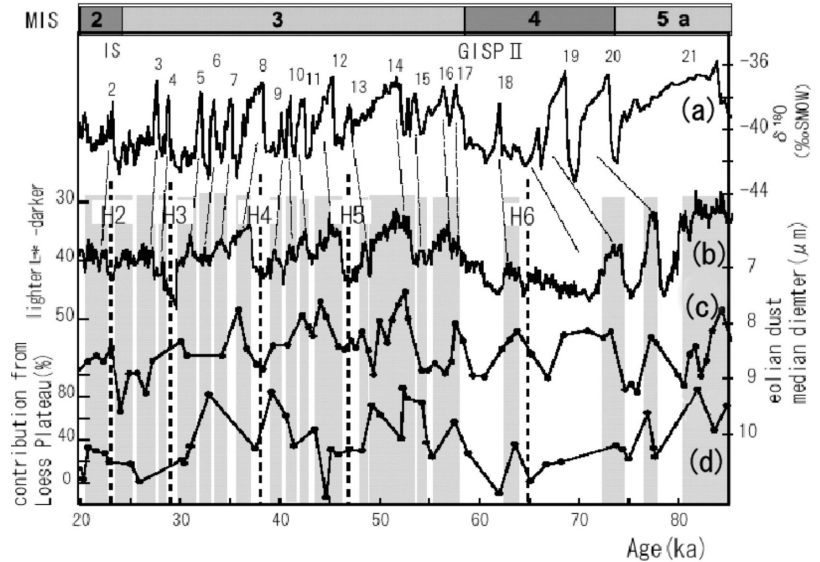
第2図 第2図グリーンランド氷床コア (GISP 2) より得られた酸素同位体比 (上、スケールは右) と日本海隠岐堆より得られた堆積物 (MD01-2407) の明度 (L^* ; 下、スケールは左) との過去5万年間の変動の比較。2つのプロファイルは、 ^{14}C 年代測定の誤差の範囲で一致している。木戸ほか(未公表データ)による。

いる。黒潮分岐流は、高温、高塩分、低栄養塩濃度で特徴付けられるのに対し、東シナ海沿岸水は、低温、低塩分、高栄養塩濃度で特徴付けられ、特にリンの濃度は、黒潮起源水の数倍に達する。従って、東シナ海沿岸水の対馬暖流への寄与率が変動すれば、日本海へ流入するリンの量もそれに連動して変化する事が期待される。

東シナ海沿岸水は、揚子江を主体とする大陸河川から流出した淡水が大陸棚上で黒潮起源水と混合する事により形成される。従って、その大陸棚上での広がり、河川流出量を反映すると考えられる。揚子江の集水域は、東アジアの夏季モンスーン降水域に当たる。そのため、その河川流出量は、夏季モンスーンの強度を反映する事が予想される。そこで、Tada *et al.* (1999) は、DOC に連動した夏季モンスーン強度の変動が、揚子江の流出量変動とそれに伴う東シナ海沿岸水域の拡大縮小、日本海へのリンの流入量の変動を通じて、日本海における明暗互層の堆積を引き起こしたと考えた。その後、中国南京郊外の Hulu Cave の石筍の酸素同位体比の分析から DOC に連動して東アジア夏季モンスーン強度が変動した事が示され (Wang *et al.*, 2001)、この仮説の妥当性が示された。

4. DOC に連動した偏西風軸の南北振動

中国内陸部における古土壌分布の時代変化に関する研究は、上に述べた様な夏季モンスーン強度の変動が、夏季モンスーンフロントの南北移動を伴っている事を示唆した (An *et al.*, 2000)。夏季モンスーンフロントの位置は、偏西風軸の位置と密接に関係していることから、DOC に連動して偏西風軸の南北振動が起こっていた可能性がある。そこで、筆者らのグループは、日本海堆積物に含まれる風成塵粒子の粒度および起源の時代変化と DOC の関係を調べた (Nagashima, 2005)。その結果、DOC に連動して、風成塵



第3図 (a) グリーンランド氷床コア (GISP 2) の酸素同位体比 (スケールは右上) と、(b) 日本海隠岐堆積物における明暗互層の明度 (L*, スケールは左中)、(c) 風成塵の粒度 (μm , スケールは右下)、(d) 中国西方砂漠黄土台地起源の風成塵の寄与率 (%、スケールは左下) の関係。長島ほか (未公表データ) による。

の粒度が変動し、亜間氷期にはその粒度が減少した事、その時には中国西方砂漠起源の風成塵の割合が増えた事、逆に、亜氷期には、風成塵の粒度が増大すると共にシベリア～中国北東部起源の風成塵の割合が増し、また、北方に向かって粒度が増大する事、などが明らかになった (第3図)。この事は、DOC の亜間氷期には、中国西方砂漠で巻き上げられて偏西風に乗って運ばれた風成塵が日本海に供給され、亜氷期にはシベリア～中国東北部から冬季モンスーン風により運ばれた風成塵が日本海に供給された事を示し、亜氷期には、偏西風軸が南下した事を示唆すると考えられる。即ち、日本海上空においては、DOC に連動して偏西風軸が、亜間氷期には北へ、亜氷期には南へ移動したと考えられる。

5. まとめ

DOC に連動した偏西風軸の移動は、最近、地中海域においても示唆されている (Moreno *et al.*, 2002)。ただし、地中海においては、亜間氷期に南下し、亜氷期には北上したと解釈されている。もしこれが本当であれば、偏西風軸の単なる南北移動と言うよりは、偏西風波動が2つのモード間で振動している事を示唆しているのかも知れない。そして、そうした2つの偏西

風波動モードを生み出す上で、北半球氷床およびヒマラヤチベットが存在が重要な役割を果たしている可能性がある。

参 考 文 献

- An, Z., S. C. Porter, J. E. Kutzbach, W. Xihao, W. Suming, L. Xiaodong, L. Xiaoqiang and Z. Weijian, 2000 : Asynchronous Holocene optimum of the East Asian monsoon, *Quart. Sci. Rev.*, **19**, 743-762.
- Dansgaard, W., S. J. Johnsen, H. B. Clausen, D. Dahl-Jensen, N. S. Gundestrup, C. U. Hammer, C. S. Hvidberg, J. P. Steffensen, A. E. Sveinbjornsdottir, J. Jouzel and G. Bond, 1993 : Evidence for general instability of past climate from 250-kyr ice core record, *Nature*, **364**, 218-220.
- Moreno, A., I. Cacho, M. Canals, M. A. Prins, M. F. Sanchez-Goni, J. O. Grimalt and G. J. Weltje, 2002 : Saharan dust transport and highlatitude glacial climatic variability : The Alboran Sea record, *Quart. Res.*, **58**, 318-328.
- Nagashima, K., 2005 : Reconstruction of Millennial-Scale Variation in Eolian Dust Transport Path to the Japan Sea Based on Grain Size and ESR Analyses, Ph.D. Thesis, Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, 154pp.
- Tada, R., T. Irino and I. Koizumi, 1999 : Land-ocean linkage over orbital and millennial timescales recorded in late Quaternary sediments of the Japan Sea, *Paleoceanography*, **14**, 236-247.
- Tada, R., I. Koizumi, A. Cramp and A. Rahman, 1992 : Correlation of dark and light layers, and the origin of their cyclicity in the Quaternary sediments from the Japan Sea, *Proc. Ocean Drill. Progr., Sci. Res.*, **127/128**, 577-601.
- Taylor, K. C., G. W. Lamorey, G. A. Doyle, R. B. Alley, P. M. Grootes, P. A. Mayewski, J. W. C. White and L. K. Barlow, 1993 : The 'flickering switch' of late Pleistocene climate change, *Nature*, **361**, 432-436.
- Wang, Y. J., H. Cheng, R. L. Edwards, Z. S. An, J. Y. Wu, C. C. Shen and J. A. Dorale, 2001 : A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China, *Science*, **294**, 2345-2348.