

最終氷期以降の日本海および周辺域の環境変遷

多 田 隆 治*



第四紀後期の日本海堆積物は、センチメートルからメートルスケールでリズムカルに繰り返す明暗の縞で特徴づけられる。日本海中南部 ODP797 地点より採取された堆積コアについて高解像度解析を行った結果、これら明暗縞は日本海全域にわたって数百年から数千年間隔で繰り返してこった海洋環境変動を反映し、近年グリーンランド氷床記録より見いだされたダンスガード・オシュガー・サイクルと呼ばれる突然かつ急激な気候変動に同調していることが明らかになった。日本海におけるその変動は、ダンスガード・オシュガー・サイクル温暖期に対応した東シナ海沿岸水の日本海への流入比率の増加、表層水塩分の低下による深層水循環の減衰、表層での生物生産性の増加とそれによる暗色縞の堆積および、寒冷期に対応した東シナ海沿岸水流入比率の減少、表層水塩分の上昇による深層水循環の強化、生物生産性の減少とそれによる明色縞の堆積で特徴づけられる。さらに、東シナ海沿岸水流入比率の増加は、中央アジアの湿潤化に伴う黄河あるいは揚子江流出量の増大を反映した可能性がある。

キーワード：日本海、最終氷期、乾湿サイクル、黄砂、ダンスガード・オシュガー・サイクル、ハインリッヒ・イベント

I. 序 論

日本海はユーラシア大陸の東縁に位置し、大陸と日本列島に挟まれた縁海で、その面積はおよそ 1,000,000 km²、平均水深は 1,350 m である。日本海は、東シナ海、太平洋、オホーツク海とそれぞれ対馬海峡(水深 130 m)、津軽海峡(130 m)、宗谷海峡(55 m)と間宮海峡(18 m)によって通じている(図 1)。黒潮の分流である対馬暖流は、現在の日本海に流入する唯一の海流で、その流量はおよそ 2Sv と推定されている(Toba *et al.*, 1982)。対馬暖流は、日本海東縁部を北上し、その主流は津軽海峡を通じて太平洋に流出する。残りは、さらに北上し、その一部は宗谷海峡からオホーツク海へと流出する(Toba *et al.*, 1982)。日本海を北上する対馬暖流と南下するリマン海流は、大和堆付近でぶつかって潮目をつくり、その位置は対馬暖流の強さに影響されると考えられる。

一方、日本海と周辺の海を隔てる 130 m という数居水深は、太平洋から日本海への深層水の流入を妨げ、その結果、日本海固有水と呼ばれる独自の深層水が形成される。日本海固有水は、日本海北部で冬期に比較的高塩分

の表層水が冷却されることにより、あるいは海水の形成に伴って形成されると考えられ(Sudo, 1986; 西山ほか, 1990; Martin *et al.*, 1992)、低い水温(約 0°C)、高い溶存酸素濃度(>210 mmol/kg)で特徴づけられる。その高い溶存酸素濃度は活発な深層水の循環を反映し、実際日本海固有水の滞留時間はおよそ 300 年と推定されている(Gamo and Horibe, 1983)。日本海はまた、中央アジア乾燥地域の風下に位置するため、初春には大量の黄砂が飛来し(Tsunogai *et al.*, 1985)、日本列島における土壌の形成にも重要な役割を果たしている(井上・成瀬, 1990)。

では、こうした日本海の海洋環境は、最終氷期においても現在と変わらなかったのだろうか? 最終氷期における汎世界的な海水準は、現在より 50 m 以上低かったことが知られている。特に、最終氷期極相期(酸素同位体ステージ 2)には、現在より 120 m 前後低かったと考えられている(Fairbanks, 1989)。また、Chappell(1994)によるニューギニアの隆起珊瑚礁の研究から、最終氷期のステージ 4 からステージ 3 にかけて、-90~-50 m くらいの間で 20 m 前後の振幅の海水準変動が繰り返し起

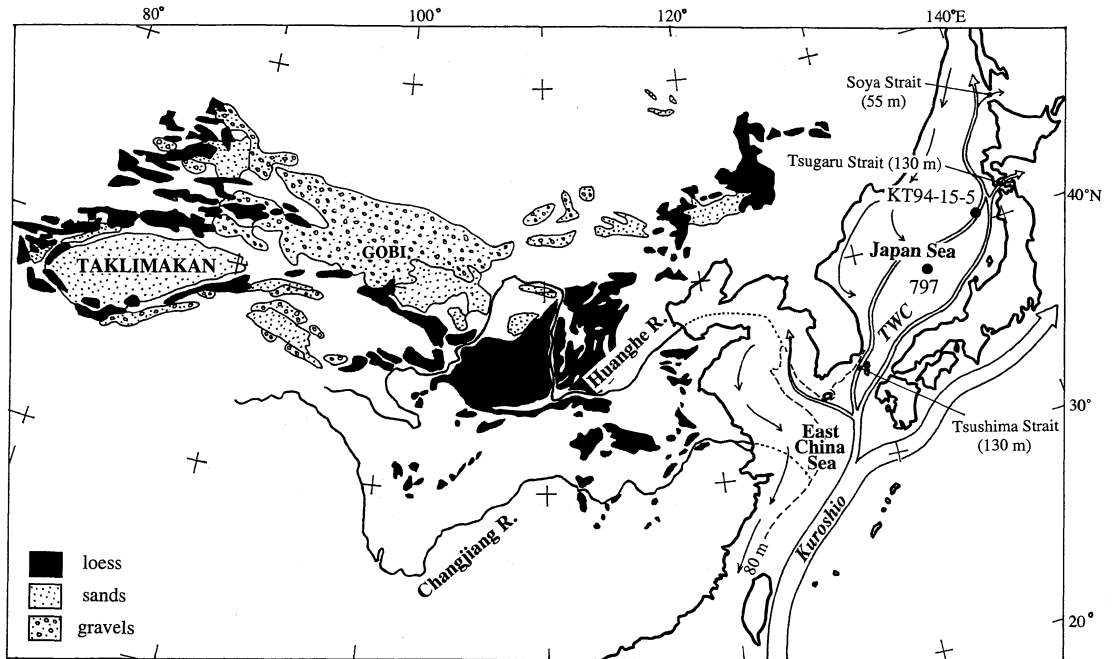


図1 現在の日本海および周辺海域の環境と ODP797 地点の位置

Fig. 1 Present environmental setting in and around the Japan Sea and location of ODP Site 797

こった可能性が示されている。最終氷期極相期における -120 m という海水準は、日本海の敷居水深 130 m とほとんど重なる。そのため、その当時は日本と大陸とが地続きになり、日本海が完全に閉鎖して湖になった可能性について、繰り返し議論がなされてきた(詳しくは、多田, 1995b)。このことに関する近年の陸上生物地理や海底地形の研究結果は、どちらかと言えば最終氷期極相期には陸橋は成立しなかったことを支持するようである(佐藤・茂木, 1982; 亀井ほか, 1988)。一方で、日本海堆積物に含まれる浮遊性有孔虫殻の酸素同位体比は、最終氷期極相期に日本海表層水の塩分が著しく低下したことを示しており(大場, 1984; Oba *et al.*, 1991; ただし堆積物の年代は大場ほか(1995)に基づき読み変えている)、日本海が孤立化したこと、あるいは黄河起源の淡水が日本海に流入したことを意味する可能性も示唆されている(大場, 1984)。実際、最終氷期に起こった 50 m を超える海水準の低下により、黄海の大部分は陸上に露出し、その結果、黄河や揚子江の河口が張り出して対馬海峡の入口にかなり近づいたと考えられる(大場, 1988; Milliman *et al.*, 1989)。氷河性海水準変動に伴うこのような変化は、日本海に流入する海流の量や性質を変化させることにより、日本海および周辺域の環境に影響を及ぼした可能性がある。

一方、風成塵のフラックスは後背地の乾燥度を反映すると考えられ、その時代変化を復元することにより後背地の気候変動を復元する試みが数多くなされている(例えば、Rea and Leinen, 1988; Hovan and Rea, 1991)。黄砂のフラックスやその時代変化についても、古砂丘や玄武岩台地上の古土壌を利用して次第に定量的な議論がなされるようになってきた(成瀬, 1993)。しかし、時間解像度が粗い、海洋変動との位相関係を直接比較することができない、などの問題点が残る。

ここでは、最近の日本海堆積物を用いた研究の成果を紹介し、最終氷期に日本海および周辺域がどのような環境変動を受けてきたかを概説する。日本海堆積物の解析結果は、東アジアを含めた日本海周辺域においてもダンスガード・オシュガー・サイクル(DOC)と呼ばれる数百年~数千年スケールで繰り返す、突然かつ急激な気候変動に同調した環境変動が存在したことを示唆している。

II. 日本海の第四紀堆積物

日本海深部には、図2に示されるような美しい明暗の縞を持つシルト質ないし珪藻質軟泥を主体とし、火山灰薄層を頻繁に介在する堆積物が広く分布する。1989年夏に行われた国際深海掘削計画(Ocean Drilling Program: ODP)第127次航海では、日本海深部計4地点で掘削を

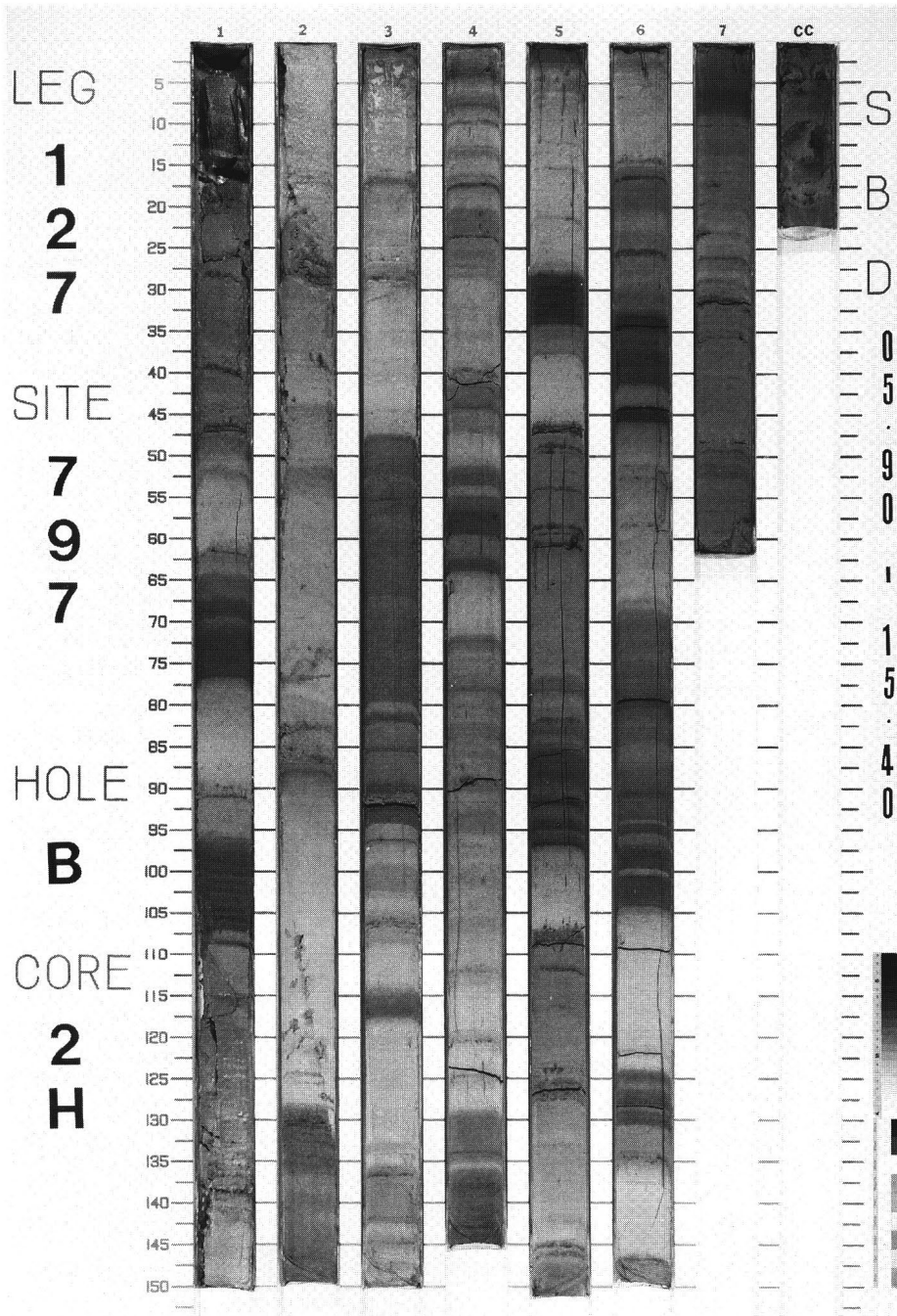


図2 第四紀後期の日本海深部堆積物に発達する明暗縞

Fig. 2 The dark and light layers in the late Quaternary sediments of the Japan Sea (ODP Hole 797B, Core2H)

行い、後期中新世から更新世の堆積物を連続的に回収した。そして、明暗の縞を持つ細粒堆積物がおよそ 2.5 Ma

に出現し、約 1.2 Ma 以降暗色縞の発達が顕著になることが明らかにされた (Tada and Iijima, 1992)。さらに、

それらの縞は日本海深部の広い範囲にわたって対比が可能で、火山灰鍵層と平行な関係を示すことから、日本海全域で同時に起こった環境変動を反映するものと考えられた(Tada *et al.*, 1992)。この明暗縞が記録する環境変動とは、一体どのようなものであろうか？ この疑問に対する答を得るため、我々は ODP 797 地点の後期更新世堆積物を用いて、高時間解像度の古環境解析を行った。ODP 797 地点は、現在の対馬暖流のフロントのすぐ南に位置し、海水準変動に伴う対馬暖流の脈動を敏感に記録している。また、ゴビ、タクラマカン砂漠など中央アジア乾燥地帯の風下に位置し、黄砂フラックスの変動を通じて、大陸内部の乾燥度の変化を記録している。

図3に、797 地点の最上部 12 m の柱状図および堆積速度曲線を示す。同地点では広域火山灰 AT および Aso-4 も認定されており(白井ほか, 1997)、年代推定の基準面に使われている。また、同地点の南約 150 km の隠岐堆より採取されたピストンコアの 8 層準について、大場ほか(1995)により浮遊性有孔虫を用いた AMS 年代値が求められており、明暗縞を用いた対比を行うことにより、

これらの層準を 797 地点に投影することが可能である。ここでは、明暗縞の境界近くに位置し、対比が正確に行える 3 層準について、基準面として採用している。また、日本海堆積物における珪藻個体数(特に、暖流系+東シナ海沿岸水系珪藻の個体数)の変動は、氷河性海水準変動によって引き起こされ、標準的酸素同位体比変動曲線と同調した変動を示している(Tada *et al.*, 1992; 多田・入野, 1994)。そこで、797 地点においても珪藻個体数の変動曲線を用いて同位体イベントを認定し、年代基準面として使用した(Tada *et al.*, 1997 投稿中)。

III. 日本海堆積物の明暗縞とダンスガード・オシュガー・サイクル(DOC)

図3に示した堆積速度曲線をもとに、797 地点および秋田沖の KT94-15-5 の明暗の度合(グレイ・スケール)の過去 125 ka の時代変化を示したのが図4である。図から明らかなように、明暗の縞は数千年のスケールで繰り返しており、その傾向は特に最終氷期に顕著である。また、一般に明色縞から暗色縞へは急激に変化するが、暗

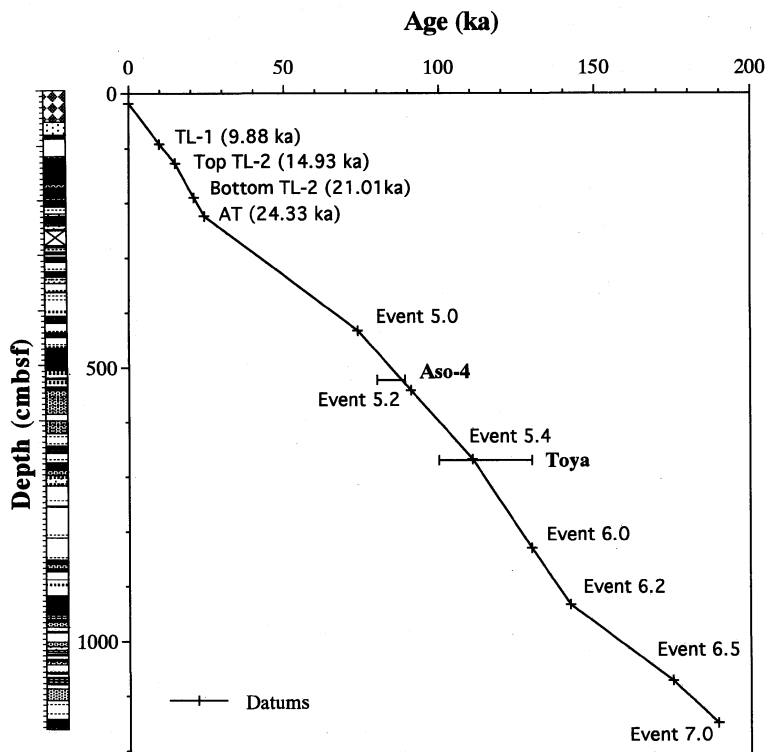


図3 ODP797 地点最上部 12 m の柱状図と年代基準面およびそれらに基づく堆積速度曲線

Fig. 3 Columnar section of the uppermost 12 m of ODP Site 797 with datum levels and sedimentation diagram adopted in this study

色縞から明色縞への変化は漸移的な場合がある。日本海堆積物にみられるこうした明暗の変化は、グリーンランドの氷床コアに記録されるダンスガード・オシュガー・サイクル(DOC)と呼ばれる酸素同位体比の急激な変動とよく対応することが明らかになってきた(図4; Tada *et al.*, 1995, 1997 投稿中)。

近年急速に進んだグリーンランド氷床記録の解析の結果、最終氷期に数百年から数千年間隔で繰り返す急激な気候変動の存在が次第に明らかになってきた(Johnsen *et al.*, 1992; Dansgaard *et al.*, 1993; Taylor *et al.*, 1993)。この変動は、ダンスガード・オシュガー・サイクル(以下、DOC)と呼ばれ、氷床を構成する氷の酸素同位体比の変動に特徴的に現れている(Dansgaard *et al.*, 1984)。氷床

の酸素同位体比の変化は、降雪時の気温および水蒸気の供給源の変化を反映していると考えられ(Kapsner *et al.*, 1995)、その変化が主として気温に起因しているとする、数十年以内での10℃近い急激な気温上昇を反映していることになる(GRIP Members, 1993)。各サイクルは数十年以内での突然かつ急激な気温上昇、数百年から4千年近くにわたって徐々に寒冷化していく温暖期、数百年以内で数℃程度のやや急激な気温降下、それに続く数百年から2千年近い寒冷期の繰り返して特徴づけられる(図4)。

図から明らかのように、日本海堆積物のグレイ・スケール変動パターンは、グリーンランドの氷床コアにみられる酸素同位体比の変動パターンときわめて類似してお

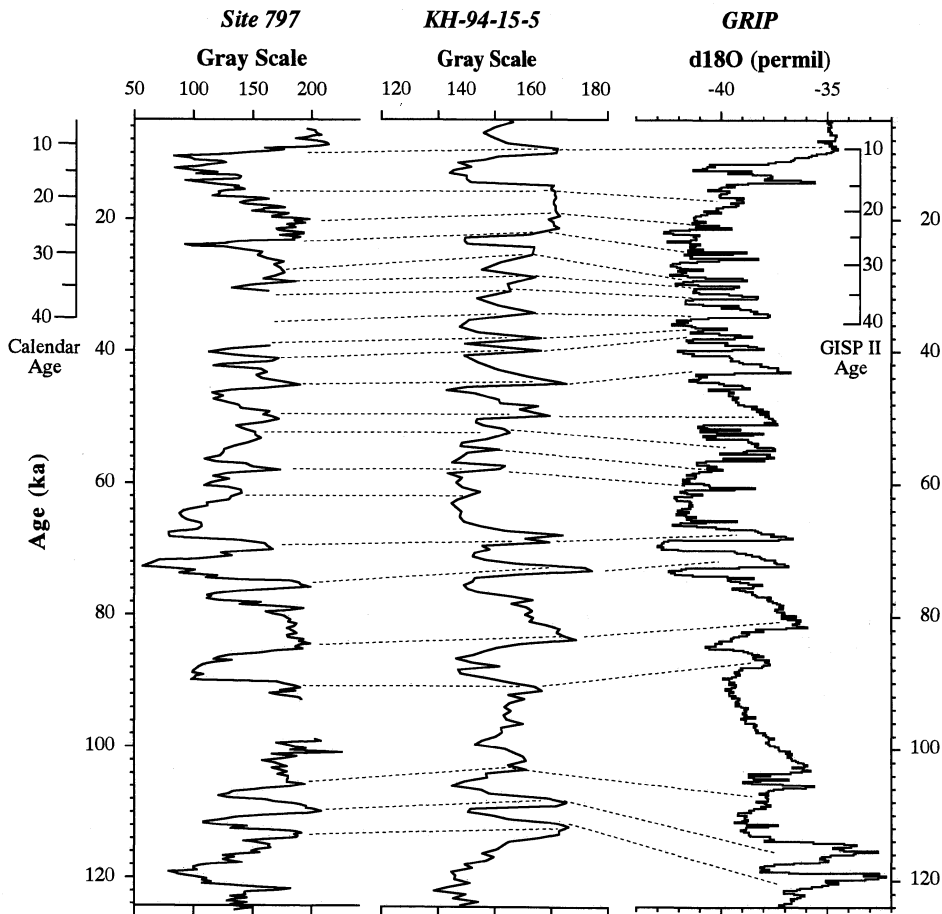


図4 日本海堆積物の暗度変化(グレイ・スケール)と GRIP 氷床コアの酸素同位体比(GRIP Members, 1993)の対比

Fig. 4 Correlation of gray scale for the Japan Sea sediments at ODP Site 797 and KH-94-15-PC5 with $\delta^{18}\text{O}$ from GRIP ice core (GRIP Members, 1993)

り、1枚1枚の暗色縞がDOCの各垂間水期に対応しているように見える。各ピークのタイミングも誤差の範囲内で一致している。100ka以前でGRIPのピークの方がやや古いのは、氷床の流動モデルに基づくGRIPの年代モデルに原因がある可能性が高い。また、23kaから15kaにかけての最終氷期極相期と128kaから120kaにかけての最終間氷期極相期および後氷期(9ka以降)には、酸素同位体比の変動パターンとグレイ・スケールの類似がみられないが、それは海水準が著しく低い時期および高い時期には、気候変動に対する日本海の応答様式が変化するためと考えられる(多田, 1994; Tada *et al.*, 1997 投稿中)。

DOCに密接に関係した気候・海洋変動は、北大西洋周辺域ではすでに数多く報告されている(Bond *et al.*, 1993; Keigwin and Jones, 1994; Thouveny *et al.*, 1994; Oppo and Lehman, 1995)。しかし、それ以外の地域からの報告は、わずかにカリフォルニアからの例があるにすぎない(Phillips *et al.*, 1994; Behl and Kennett, 1996)。そのため、日本海堆積物にみられる明暗の縞がDOCに対応するという発見(Tada *et al.*, 1995)は、この現象が単にグリーンランド周辺にとどまらず、少なくとも半球的な現象であることを示すものとして重要である。それでは、これらDOCに対比される明暗縞は、どのような環境変動を反映しているのだろうか？

IV. 明暗縞が記録する環境変動

Tada *et al.* (1995, 1997 投稿中)は、この明暗の縞が記録する環境変動の実態を明らかにする目的で、ODP 797地点の堆積物試料を約6cm(0.9ka)間隔で採取し、その珪藻個体数および群集組成、有機炭素量、鉱物・化学組成を調べた。

1. 表層水環境の変動

珪藻化石は、表層水の起源に関する情報を持っている。797地点の珪藻群集は、*Azpeitia nodulifera*, *Pseudoenotia doliolus*, *Nitzschia marina*, *Thalassiosira oestrupii*などの暖流系種、沿岸性種の*Paralia sulcata*, そして*Neodenticula seminae*, *Thalassiosira trifulta*, *Thalassiosira nordenskioldii*などの寒流系種などからなる。Tada *et al.* (1995, 1997 投稿中)は、暖流系種を対馬暖流起源、*P. sulcata*を東シナ海沿岸水起源と考え、単位重量堆積物当たりのそれらの個体数之和は対馬海峡からの海流の強さを、それらの相対比は対馬海峡から流入する海流の性質を反映すると解釈した。実際、最近の研究では、黄海あるいは東シナ海沿岸水が、朝鮮半島南縁に沿って対馬暖流に引きずられるようにして日本海に流入していることが明らかにされている(Suk *et al.*, 1996)。

797地点における過去12万年間の暖流系種および*P. sulcata*の個体数の変動および暖流系種と*P. sulcata*の和に対する*P. sulcata*の割合の変動を図5に示す(図5-b, 5-c)。暖流系種や*P. sulcata*の個体数は数千年のスケールで2桁以上変動し、暗色縞の堆積期にそれらの値が高い傾向がある。しかし、図をよくみると暖流系種と*P. sulcata*の個体数之和の増加が暗色縞の堆積に先行する場合があります。その場合は暖流系種の個体数の増加の寄与が大きい。また、こうした位相のずれは、特に酸素同位体ステージ3において顕著である。一方、*P. sulcata*の個体数やその暖流系種に対する割合は、暗色縞の堆積期に高い傾向が顕著である。これは、暗色縞の堆積が対馬海峡からの東シナ海沿岸水の流入が強まった時期に始まり、対馬暖流の流入の増大はそれと同時に、あるいはそれよりやや(<2千年)先行していたことを示唆する。

堆積物の有機炭素量はさまざまな要因に影響される。797地点後期第四紀堆積物のように堆積速度が比較的一定で、また海洋プランクトン起源の有機物を主体とする堆積物においては、表層での生物生産量および生産された有機物のその後の分解の程度が有機炭素量を規制する主要因と考えられる(多田, 1995a)。そして、海底での有機物の酸化分解の程度は、底層水の酸化還元度の影響を受け、酸素に乏しい還元環境ではその分解が抑制されると考えられている(Berner, 1989; Canfield, 1994)。797地点における過去12万年間の有機炭素量の変動を図5-aに示す。図から明らかなように、有機炭素量は暗色縞で高く、明色縞で低い。実際に、有機物の存在は堆積物の明暗の主要因であると考えられる(Tada *et al.*, 1992)。しかし、797地点の第四紀後期の堆積物における有機炭素量の変動は、次に述べる底層水の酸化還元度の変動だけでは説明しきれず、表層における生物生産性の変動を反映していると考えられる(多田・入野, 1994)。この考えに従えば、暗色縞の堆積時に日本海表層での生物生産性が高まったことになる。

2. 深層水環境の変動

底層水の酸化還元度は、深層水の循環速度や表層での生物生産量を反映する(多田, 1995a)。そして、黄鉄鉱/有機炭素比や平行葉理の保存度は、底層水の酸化還元度の指標として広く用いられている(Berner and Raiswell, 1983; Tada, 1991)。Tada *et al.* (1992, 1997 投稿中)は、これらの指標を組み合わせることにより、底層水の酸化還元環境を硫化水素が発生する強還元的環境(Euxinic)、硫化水素は発生しないが溶存酸素がほとんど存在しない弱還元的環境(Suboxic)、底層生物が生存できる程度の溶存酸素が存在する酸化的環境(Oxic)の3段階に区分することを提唱し、それを797地点の第四紀

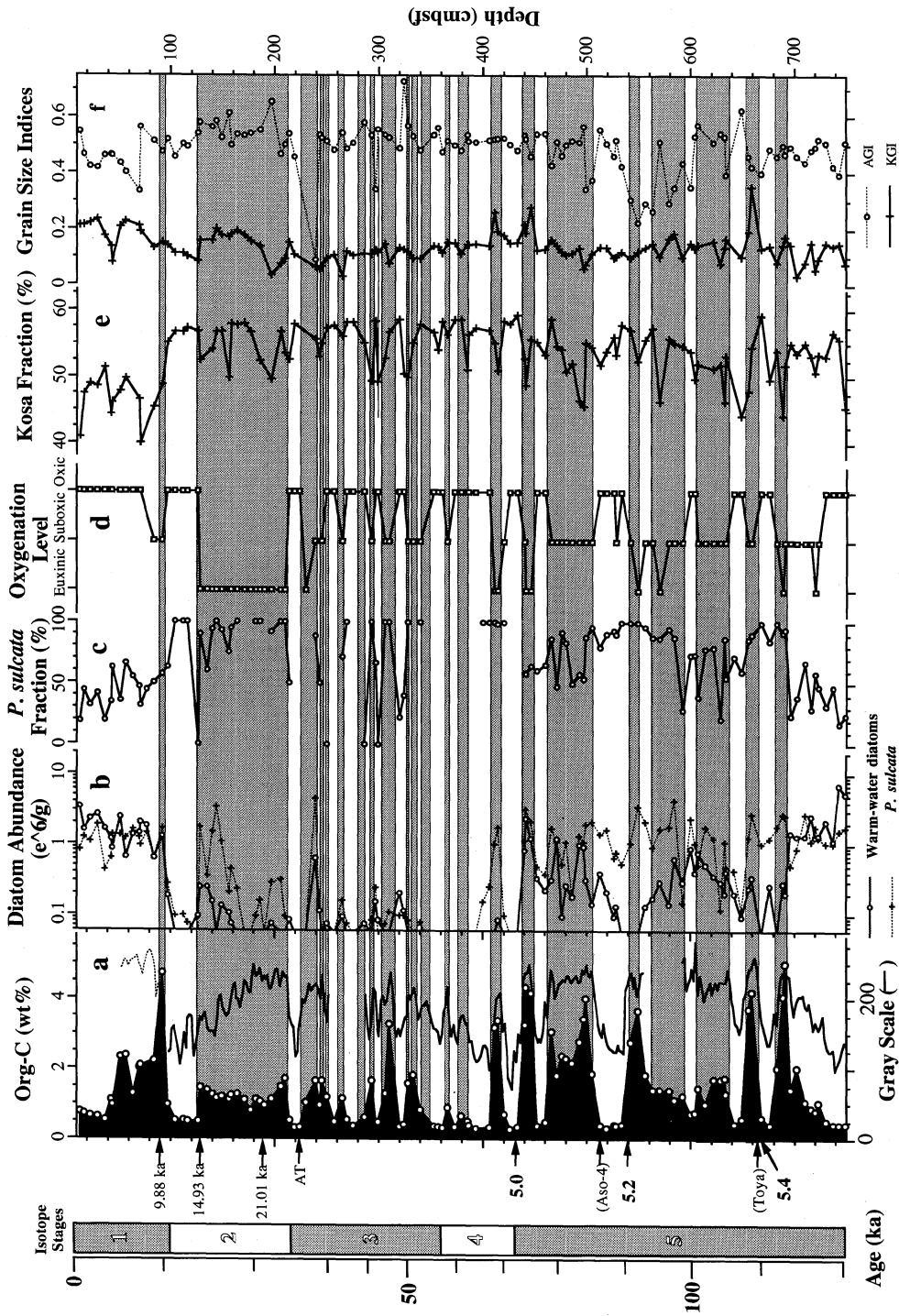


図5 797地点における(a)有機炭素量とグレイ・スケール、(b)珪藻個体数、(c) *P. sulcata* の割合、(d) 底層水還元度、(e) 黄砂フラクション、(f) 黄砂および島弧起源碎屑物粒度指標、の変動と暗暗層の関係

Fig. 5 The relationship among (a) organic carbon content and gray scale, (b) *P. sulcata* fraction, (c) *P. sulcata* fraction, (d) bottom water oxygenation level, (e) Kosa fraction, (f) Kosa and Arc-derived detritus grain size indices, and their relation with dark and light layers

堆積物に適用した。797 地点では、明色縞は生物擾乱を受けているのに対し、暗色縞は生物擾乱がみられず、多くの場合、平行葉理が認められる。

図 5-d は、797 地点における過去 12 万年の底層水の酸化還元度の変化を示している。図から明らかなように、明色縞は酸化環境を示すのに対し、氷期の極相期に堆積した比較的厚い暗色縞は強還元的底層水環境を、それ以外の時期に堆積した比較的薄い暗色縞は弱還元的底層水環境を示す。

3. 黄砂フラクシオンおよび粒度指標

一般に、黄砂に代表される風成塵フラックスは後背地の乾燥度を、その粒径は卓越風の強さを反映すると考えられている (Rea *et al.*, 1985)。また、現在の日本海への黄砂フラックスは $1.4\sim 4.3\text{ g/cm}^2/\text{ky}$ と見積もられ (Tsunogai *et al.*, 1985)、その量は日本海深部堆積物の質量堆積速度 (例えば 797 地点の第四紀後期の堆積物では $4.1\text{ g/cm}^2/\text{ky}$) に匹敵する。これは、日本海深部の堆積物が黄砂フラックス変動の研究に適していることを示唆している。Iriano and Tada (1997 投稿中) は、日本海堆積物中に含まれる黄砂起源碎屑物粒子の含有量を推定する目的で、堆積物の主要元素組成の分析を行った。主として碎屑物に起因する 6 元素 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、および碎屑性 SiO_2 を選び出して Q モード因子分析を行い、4 つの因子を抽出した。さらに因子軸の斜交回転を行い、因子のスコアおよび各試料についての因子負荷がすべて正の値をとるような因子スコアの範囲を求めた。こうして求められた因子スコア (= 端成分組成) を想定される供給源 (黄砂および日本列島起源細粒碎屑物) の組成と比較して、Iriano and Tada (1997 投稿中) は、4 つの因子がおのおの粗粒 (シルトサイズ) 黄砂、細粒 (粘土サイズ) 黄砂、粗粒島弧起源碎屑物、細粒島弧起源碎屑物に対応すると解釈した。そして、この結果をもとに全碎屑物に占める黄砂起源粒子の割合を黄砂フラクシオン、全黄砂起源碎屑物に占める粗粒黄砂粒子の割合を黄砂粒度指標、全島弧起源碎屑物に占める粗粒島弧起源粒子の割合を島弧起源碎屑物粒度指標と定義し、それらの過去 12 万年間の変動を復元した。その結果を図 5-e、5-f に示す。

図から明らかなように、黄砂フラクシオンは 40~60% の間で変動し、氷期に高く間氷期に低くなる傾向が顕著である。さらに、数千年のスケールで 10% に達する振幅を持つ変動が存在する。これら数千年スケールの変動における黄砂フラクシオンの極小値は、暗色縞の堆積開始直後あるいは最大で 2 千年程度遅れて達成されている。一方、黄砂粒度指標では、氷期-間氷期に対応した変動はあまり明確ではなく、むしろ数千年スケールでの変動

が認められ、間氷期には暗色縞中で極大値を持ち、氷期には暗色縞中で極小値を持つ傾向がみられる。黄砂および島弧起源碎屑物粒度指標の変動を黄砂フラクシオンの変動と比較すると、黄砂粒度指標の極小値は、黄砂フラクシオンの極小値と一致するか、やや遅れる場合が多いのに対して、島弧起源碎屑物粒度指標は、その極大値が、位相のずれなく黄砂フラクシオンの極小値と一致する場合が多い。

V. ダンスガード・オシュガー・サイクル (ODC) に対する日本海の応答

以上に述べた古環境パラメータの変動は、すべて DOC に同調した数千年スケールの変動を示している。では、それらは日本海を取り巻く古環境システムのどのような挙動によって引き起こされたのだろうか？

すでに説明したように、暖流系珪藻と *P. sulcata* の個体数に示される対馬海峡からの海流流入パルスは、間氷期には暗色縞の堆積とほぼ同時であり、氷期には千年前後先行することが多い。一方、*P. sulcata* の暖流系種に対する割合の増加に示される東シナ海沿岸水の流入パルスは、暗色縞の堆積とほぼ同期している。また、暗色縞の堆積期には、日本海底層水は貧酸素状態になっている。さらに、黄砂フラクシオンおよび黄砂粒度指標の減少は、暗色縞の堆積と同時に 2 千年前後遅れて起こっている。では、こうした各パラメータの位相関係は、どのように説明すればよいのだろうか？

対馬海峡からの海流流入は、海水準変動あるいは黒潮の流路に影響を受ける。東シナ海から得られた堆積コアの解析によると、最終氷期の東シナ海は、常に黒潮の影響を受けていたと考えられる (大場, 1985)。したがって、暖流種と *P. sulcata* の個体数に示される対馬海峡からの海流流入パルスは、黒潮の流路の変化よりもむしろ海水準の急激な上昇を示す可能性がある。実際、Chappell (1994) は、ニューギニアの隆起珊瑚礁の研究に基づいて、最終氷期に数千年スケールで 20 m 近い海水準の上昇・下降が繰り返したことを示している。さらに、我々の研究から、これら高海水準イベントがハイニンリッヒ・イベントと呼ばれる氷床崩壊イベントと関係している可能性が出てきた (図 6)。

ハイニンリッヒ・イベントとは、北大西洋高緯度域において最終氷期の堆積物中に広域にわたって繰り返される Ice-rafted debris (IRD) 堆積イベントである (Heinrich, 1988)。大量の氷山が北大西洋に流出し、そこで融解したことを反映し、氷床の大規模崩壊を示すと考えられている。そして、IRD を構成する碎屑粒子の供給源の検討から、ハイニンリッヒ・イベントが、ローレンタ

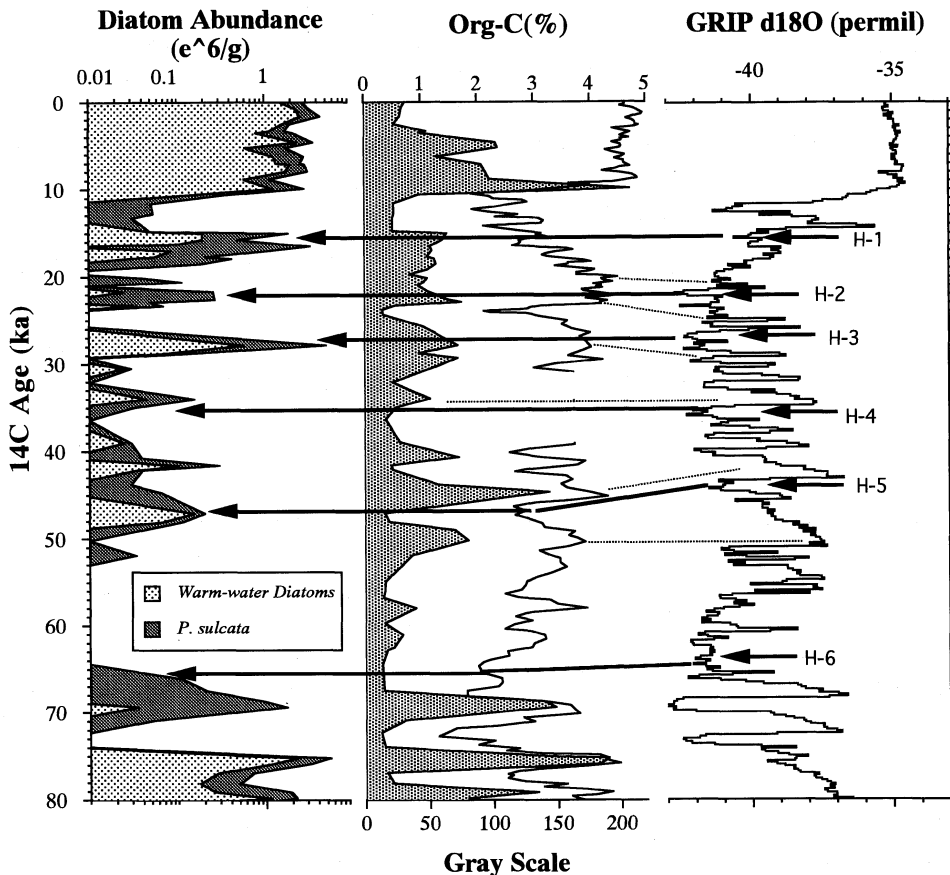


図6 797地点における珪藻個体数、グレイ・スケールの変動とハインリッヒ・イベントの関係
GRIPの $\delta^{18}\text{O}$ との対応はBond *et al.* (1993)に基づく。

Fig. 6 The correlation between variation in diatom number and gray scale at ODP Site 797 and Heinrich Events
The correlation between GRIP $\delta^{18}\text{O}$ and Heinrich events is based on Bond *et al.* (1993).

イド氷床北部セクターの大規模崩壊に起因したことが明らかにされた(Bond and Lotti, 1995; Gwiazda *et al.*, 1996). MacAyeal(1993)によれば、ハインリッヒ・イベントを引き起こしたローレントイド氷床北部セクターの崩壊のみにより、少なくとも3.5mの海水準の上昇が引き起こされる。さらに、ハインリッヒ・イベントに際しては、ローレントイド氷床北部セクターのみでなく、それ以外の氷床も崩壊していたことも明らかになってきた(Bond and Lotti, 1995)。これらのことを考え合わせると、ハインリッヒ・イベントを引き起こした氷床崩壊により、10mを超える海水準の上昇が引き起こされた可能性は十分あるといえよう。

Bond *et al.* (1993)は、北大西洋堆積物コアの検討に基づき、ハインリッヒ・イベントがDOCと密接に関係する

ことを示した。DOCを詳しくみると、必ずしも同じ周期、同じ振幅で繰り返しているのではなく、振幅が次第に小さくなるとともに、温暖期の期間も次第に短くなる7千年から1万年程度のより長い周期の変動で東ねられ、それはボンド・サイクルと呼ばれている(Lehman, 1993)。ハインリッヒ・イベントは、このボンド・サイクルの最終段階で寒冷化が極限に達した時に起こっており、その直後に最も振幅が大きく急激な温暖化が起こっている(Bond *et al.*, 1993)。対馬海峽からの海流流入パルスにより示唆される海水準の上昇が、暗色縞の堆積に千年前後先立って起こっていたとすれば、それはハインリッヒ・イベントに起因していた可能性が高い(図6)。

前述のように、日本海堆積物にみられる明暗縞の繰り返しは、DOCと同調している可能性が高い。そして、暗

色縞の堆積開始が東シナ海沿岸水の流入量あるいは寄与率の増加と同調していることは、栄養塩に富み塩分の低い東シナ海沿岸水 (Hong *et al.*, 1995) の流入が日本海内での生物生産性の上昇と深層水形成の低下を引き起こし、さらにそれらに伴う深層水中の溶存酸素の低下が堆積物中の有機物含有量を増加させたためだと説明できる (多田, 1995a)。東シナ海沿岸水は、黒潮起源の表層水と、黄河や揚子江から流出する淡水が混ざりあって形成されるため、その広がりには両河川の流出量に強く影響されると予想される。特に、最終氷期においては海水準が現在より 50~120 m も低かったため、黄河の河口は対馬海峡の入口に近づき (図 1)、黄河流出量の変動が対馬海峡入口付近に張り出した東シナ海沿岸水域の消長に影響を与えやすい状況が整っていた。この考えに基づけば、*P. sulcata* の割合の増加に示される東シナ海沿岸水の日本海への流入と、それに伴う暗色縞の堆積は、黄河の流出量の増加を反映し、それは中央アジア乾燥地帯における降水量の増加を示す (Tada *et al.*, 1997 投稿中)。

暗色縞の堆積が中央アジア湿潤化と対応しているということは、暗色縞における黄砂フラクションの減少からも支持される (図 5)。黄砂フラクションの極小値は、黄砂フラックスの減少あるいは島弧起源碎屑物フラックスの増加により引き起こされる。現時点では、明暗縞 1 枚 1 枚についての堆積速度の推定ができないため、どちらが黄砂フラクション極小値の原因であるか特定できない。しかし、黄砂フラックスの減少が原因であれば、中央アジア内陸部の湿潤化を、島弧起源碎屑物フラックスの増大が原因であれば、日本列島日本海側における河川流出量の増大を示唆するので、いずれの場合も、中央から東アジアにかけての湿潤化を示唆する点では一致している。

では、黄砂フラクションや粒度指標の減少が暗色縞の堆積より 2 千年前後遅れる場合については、どう説明すればよいのだろうか？ このことについてはまだ想像の域を出ないが、(1) 河川流出の増加は降水量の増加に即時に応答するのにに対し、黄砂フラックスの減少は、降水量の増大によってアジア内陸の砂漠域が植生に覆われるのに要する時間だけ位相がずれる、あるいは、(2) 黄河の集水域と黄砂の供給源域とに若干のずれがあり、やや南に位置する黄河 (や揚子江) の集水域において湿潤化がやや先行した、といった解釈が可能だろう。これは、今後解決すべき問題である。

VI. 最終氷期極相期の日本海

最終氷期のある時期に日本海表層水の塩分が著しく低下したことは、すでに大場 (1984) により浮遊性有孔虫殻

の酸素同位体比に基づいて指摘されていた。そして、その時期は当初最終氷期極相期より前とされていた。しかし、最近大場ほか (1995) は、AMS による放射性炭素同位体年代値を出し直し、日本海における低塩分イベントが最終氷期極相期に起こったことを示した。一方、対馬海峡付近の海底地形や生物地理の研究結果は、最終氷期極相期に対馬海峡が陸化した可能性には否定的で、水深 10 m 前後の海峡が残ったことを示唆している (多田, 1995b)。

では、最終氷期極相期における日本海表層水の低塩分化は、どのようにして起こったのだろうか？ 大場 (1984, 1988) は、済州島の東の流路を通して対馬海峡の入口に流れ出た黄河の河川水が日本海に流入したと考えた。さらに、珪藻化石群集組成も、この時期に対馬暖流が流入していたことを示している。ただし、その後の詳細な海底地形や音波探査断面の検討によれば、大場が考えた流路は考えにくいといわれる (Keigwin and Gorbarenko, 1992)。多田 (1995) は、大場 (1984) に示される酸素同位体比が 25 ka~17 ka にかけて徐々に減少した後、最終氷期極相期にあたる 17 ka~15 ka にかけて 24% の値を保っていたことに着目した (図 7)。そして、対馬海峡からの少量の海流の流入と日本海への降水および流入する河川からの淡水の供給とのバランスがこの現象を説明できると考えた。簡単なボックスモデルに基づき、日本海および周辺集水域における降水量-蒸発量が対馬海峡から流入する海流の流量の 2.4 倍あれば、この低塩分化を説明できるとした (図 7)。ちなみに、氷期の日本海の (降水量-蒸発量) が現在の半分の 90 km³/y だったとすると、対馬海峡からの海水の流入量は 210 km³/y となり、これは現在の流入量の 0.5% 程度となる。一方、当時の対馬海峡の水深が 10 m であったとすると、その断面積は 1% 程度となることから、上の推定値は妥当であると思われる。

VII. 後氷期の日本海

大場ほか (1995) の AMS 年代値に基づく、日本海堆積物にみられる最も新しい暗色縞は約 1 万年前、ヤンガードリアスと呼ばれる汎世界的な寒冷期の直後に堆積している。Oba and Okumura (1997 投稿中) は、この暗色縞堆積時に表層水の塩分がわずかながら減少したことを示した。これは、この暗色縞も DOC に同調した一連の暗色縞と同様に、塩分がやや低い東シナ海沿岸水の流入に伴って堆積し、およそ 1 万年前に中央アジアが一時的に湿潤化したことを示唆する。図 5 における黄砂フラクションの変動は、およそ 5 千年前にも中央アジアの湿潤化が起っていたことを暗示している。このことは、

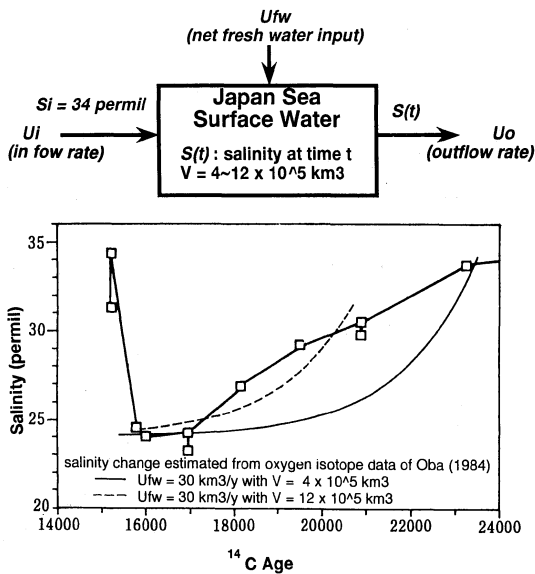


図7 ボックスモデル(上図)に基づき推定した最終氷期極相期における日本海表層水塩分変化と浮遊性有孔虫殻の酸素同位体比(大場, 1984)から推定した表層水塩分変化の比較(下図)

Fig. 7 Predicted variation in surface water salinity of the Japan Sea during the last glacial maximum based on the simple box model (upper), and its relation to the estimated salinity variation (lower) based on oxygen isotope data of planktonic foraminifera by Oba (1984)

中国黄土高原における古土壌の発達時期(Porter, 1989)とも調和的である。一方、この時期のグリーンランド氷床コアの酸素同位体比には、このような気候変動は記録されていない。もし、後氷期の日本海および周辺域における数千年スケールの気候変動が、DOCを引き起こしたと同じ要因によるものだとすれば、その要因は高緯度域ではなくむしろ中・低緯度域の気候システムの挙動にあるのかもしれない(多田, 1997 投稿中)。

VIII. ま と め

以上述べてきたように、最終氷期の日本海および周辺域では、数百年から数千年スケールの乾湿サイクルで特徴づけられる気候変動が起っていた。この変動は、グリーンランドや北大西洋周辺域においてダンスガード・オシュガー・サイクル(DOC)として知られる突然かつ急激な気候変動に同調するものである。また、日本海堆積物からもこれに同調した変動が見いだされ、ダンスガード・オシュガー・サイクル(DOC)が少なくとも半球的な現象であることを示している。日本海および周辺域におけるこの乾湿サイクルは、東シナ海沿岸水流入率の変動を通じて日本海表層の生物生産量や深層水循環の変動を引き起こしていた。そして、日本海への東シナ海沿岸水の流入率の変動は、黄河(あるいは揚子江)の河川流出量の変動を反映している可能性が高い。また、珪藻個体数変動に示される対馬海峡からの海流流入パルスは、大規模な氷床崩壊に伴う急激な海水準変動を反映している可能性がある。ただし、最終氷期極相期の日本海は、海水準の著しい低下により対馬海峡からの海流の流入が制約

され、表層水の塩分が低下したため、深層水循環は長期にわたって停滞した。中央アジアにおいては、数千年スケールでの乾湿サイクルが後氷期にも引続き起こっていた可能性が高い。

謝辞 本研究を行うに当たって、東京大学海洋研究所およびテキサス A & M 大学の ODP 関係者の方々に多くの協力をいただきました。また、東京大学の米倉伸之教授には、講演および執筆の機会を与えていただきました。深く感謝いたします。この研究には、文部省科学研究費 No. 05405002 (研究代表者: 多田隆治) を使用いたしました。

引用文献

- Behl, R. J. and Kennett, J. P. (1996) Brief interstadial events in the Santa Barbara basin, NE Pacific, during the past 60 kyr. *Nature*, 379: 243-246
- Berner, R. A. (1989) Biogeochemical cycles of carbon and sulfur and their effect on atmospheric oxygen over Phanerozoic time. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. (Global and Planetary Change Section)*, 75: 97-112
- Berner, R. A. and Raiswell, R. (1983) Burial of organic carbon and pyrite sulfur in sediments over Phanerozoic time: a new theory. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47: 855-862
- Bond, G., Broecker, W., Johnson, S., McManus, J., Labeyrie, L., Jouzel, J. and Botani, G. (1993) Correlations between climate records from North Atlantic

- sediments and Greenland ice. *Nature*, 365: 143-147
- Bond, G. and Lotti, R. (1995) Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciation. *Science*, 267: 1005-1010
- Canfield, D. E. (1994) Factors influencing organic carbon preservation in marine sediments. *Chemical Geology*, 114: 315-329
- Chappell, J. (1994) Upper Quaternary sea levels, coral terraces, oxygen isotopes and deep-sea temperatures. *Jour. Geogr.*, 103: 828-840
- Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N., Hammer, C. U. and Oeschger, H. (1984) North Atlantic climatic oscillations revealed by deep Greenland ice cores. J. F. Hansen and T. Takahashi (eds.) *Climate processes and climate sensitivity*: 288-298, American Geophysical Union
- Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N. S., Hammer, C. U., Hvidberg, C. S., Steffensen, J. P., Sveinbjornsdottir, A. E., Jouzel, J. and Bond, G. (1993) Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364: 218-220
- Fairbanks, R. G. (1989) A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, 342: 637-642
- Gamo, T. and Horibe, Y. (1983) Abyssal circulation in the Japan Sea. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 39: 220-230
- GRIP Members (1993) Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core. *Nature*, 346: 203-207
- Gwiazda, R. H., Hemming, S. R. and Broecker, W. S. (1996) Tracking the sources of icebergs with lead isotopes: The provenance of ice-rafted debris in Heinrich layer 2. *Paleoceanography*, 11: 77-93
- Heinrich, H. (1988) Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quat. Res.*, 29: 143-152
- Hong, G. H., Kim, S. H., Chung, C. S., Kang, D. J., Choi, J., Lee, T. S. and Chung, J. Y. (1995) Nutrients and biogeochemical provinces in the Yellow Sea. S. Tsunogai *et al.* (eds.) *Global fluxes of carbon and its related substances in the coastal sea-ocean-atmosphere system, Proceedings of the 1994 Sapporo IGBP symposium*: 114-128
- Hovan, S. A. and Rea, D. K. (1991) Late Pleistocene continental climate and oceanic variability recorded in Northwest Pacific sediments. *Paleoceanography*, 6: 349-370
- 井上克広・成瀬敏郎 (1990) 日本海沿岸の土壌および古土壌中に堆積したアジア大陸起源の広域風成塵. 第四紀研究, 29: 209-222
- Irino, T. and Tada, R. (1995) Temporal variation of the Kosa flux at ODP Site 797, the Japan Sea during last 150 ka. S. Tsunogai *et al.* (eds) *Global fluxes of carbon and its related substances in the coastal sea-ocean-atmosphere system, Proceedings of the 1994 Sapporo IGBP symposium*: 511-516
- Irino, T. and Tada, R. (1997 submitted) Quantification of Kosa (aeolian dust) contribution to the sediments and estimation of its flux variation during the last 200 kyrs. *Paleoceanography*
- Johnsen, S. J., Clausen, H. B., Dansgaard, W., Fuhrer, K., Gundestrup, N., Hammer, C. U., Iversen, P., Juzel, J., Stauffer, B. and Steffensen, J. P. (1992) Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core. *Nature*, 359: 311-313
- 亀井節夫・樽野博幸・河村善也 (1988) 日本列島の第四紀地史への哺乳動物相のもつ意義. 第四紀研究, 26: 293-303
- Kapsner, W. R., Alley, R. B., Shuman, C. A., Anandarkrishnan, S. and Grootes, P. M. (1995) Dominant influence of atmospheric circulation on snow accumulation in Greenland over the past 18,000 years. *Nature*, 373: 52-54
- Keigwin, L. D. and Gorbarenko, S. A. (1992) Sea level, surface salinity of the Japan Sea, and the Younger Dryas event in the northwestern Pacific Ocean. *Quat. Res.*, 37: 346-360
- Keigwin, L. D. and Jones, G. A. (1994) Western North Atlantic evidence for millennial-scale changes in ocean circulation and climate. *Jour. Geophys. Res.*, 99: 12397-12410
- Lehman, S. (1993) Ice sheets, wayward winds and sea change. *Nature*, 365: 108-110
- MacAyeal, D. R. (1993) A low order model of the Heinrich events cycle. *Paleoceanography*, 8: 767-775
- Martin, S., Munoz, E. and Druker, R. (1992) The effect of severe storms on the ice cover of the northern Tatarskiy Strait. *Jour. Geophys. Res.*, 97(C11): 17753-17764

- Milliman, J. D., Qin, Y. and Park, Y. A. (1989) Sediments and sedimentary processes in the Yellow and East China seas. A. Taira and F. Masuda (eds.) *Sedimentary facies in the active plate margin*: 233-249, Terra Scientific Pub. Co.
- 成瀬敏郎 (1993) 東アジアにおける最終間氷期以降の広域風成塵の堆積変化. 地形, 14: 265-277
- 西山勝暢・川江 訓・佐々木秀行 (1990) 日本海固有水の生成と暖水渦. 神戸海洋気象台彙報, 209: 1-10
- 大場忠道 (1984) 最終氷期以降の日本海—酸素・炭素同位体比—KH-79-3, C-3 コアの解析を中心として. 月刊地球, 6: 558-566
- 大場忠道 (1985) 酸素・炭素同位体比及び微化石による日本周辺海域の古環境復元. 1~15, 昭和59年度科学研究費補助金研究成果報告書
- 大場忠道 (1988) 海水準変化に関するコメント. 第四紀研究, 26: 243-250
- Oba, T., Kato, M., Kitazato, H., Koizumi, I., Omura, A., Sakai, T. and Takayama, T. (1991) Paleoenvironmental changes in the Japan Sea during the last 85,000 years. *Paleoceanography*, 6: 499-518
- 大場忠道・村山雅史・松本英二・中村俊夫 (1995) 日本海隠岐堆コアの加速器質量分析 (AMS) 法による ^{14}C 年代. 第四紀研究, 34: 289-296
- Oba, T. and Okumura, S. (1997 submitted) Depositional mechanism for dark layers in the Japan Sea. *Paleoceanography*
- Oppo, D. W. and Lehman, S. J. (1995) Suborbital timescale variability of North Atlantic Deep Water during the past 200,000 years. *Paleoceanography*, 10: 901-910
- Phillips, F. M., Campbell, A. R., Smith, G. I. and Biscoff, J. L. (1994) Interstadial climatic cycles: A link between western North America and Greenland? *Geology*, 22: 1115-1118
- Porter, S. (1989) Volcanic records and loess deposits. R. Bradley (ed.) *Global Changes of the Past*: 295-320, Boulder, Colorado, UCAR/Office for Interdisciplinary Earth Studies
- Rea, D. K. and Leinen, M. (1988) Asian aridity and the zonal westerlies: Late Pleistocene and Holocene record of eolian deposition in the Northwest Pacific Ocean. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 66: 1-8
- Rea, D. K., Leinen, M. and Janecek, R. (1985) Geologic approach to the long-term history of atmospheric circulation. *Science*, 227: 721-725
- 佐藤任弘・茂木昭夫 (1982) 海底地形からみた日本海の水準変化. 第四紀研究, 21: 203-210
- 白井正明・多田隆治・藤岡換太郎 (1997) ODP 日本海試料との対比に基づく男鹿半島安田海岸更新世中—後期テフラの同定と年代. 第四紀研究, 36: 183-196
- Sudo, H. (1986) A note on the Japan Sea Proper Water. *Prog. Oceanogr.*, 17: 313-336
- Suk, M. S., Hong, G. H., Chung, C. S., Nam, S. Y. and Kang, D. J. (1996) Distribution and transport of suspended particulate matter, dissolved oxygen and plant major inorganic nutrients in the Cheju Strait. *Jour. Korean Soc. Oceanogr.*, 31: 55-63
- Toba, Y., Tomizawa, K., Kurasawa, Y. and Hanawa, K. (1982) Seasonal and year-to-year variability of the Tsushima—Tsugaru Warm Current system with its possible cause. *La mer*, 20: 41-51
- Tada, R. (1991) Origin of rhythmical bedding in middle Miocene siliceous rocks of the Onnagawa Formation, northern Japan. *J. Sed. Petrol.*, 61: 1123-1145
- 多田隆治 (1994) 石油探鉱における堆積リズム解析の可能性—第四紀日本海海洋循環ダイナミックスの復元を例として—. 石油技術協会誌, 59: 54-62
- 多田隆治 (1995a) 我が国における石油根源岩堆積環境の再検討. 石油技術協会誌, 60: 5-14
- 多田隆治 (1995b) 日本とアジア大陸を結ぶ最終氷期の陸橋. 小泉 格・田中耕治編「海と文明」: 31-48, 朝倉書店
- Tada, R. and Iijima, A. (1992) Lithostratigraphy and compositional variation of Neogene hemipelagic sediments in the Japan Sea. K. A. Pisciotto, J. C. Ingle Jr, M. T. von Breymann, J. Barron *et al.* (eds.) *Proc. ODP, Sci. Results*, 127/128: 1229-1260, College Station, TX (Ocean Drilling Program)
- Tada, R., Koizumi, I., Cramp, A. and Rahman, A. (1992) Correlation of dark and light layers, and the origin of their cyclicity in the Quaternary sediments from the Japan Sea. K. A. Pisciotto, J. C. Ingle Jr., M. T. von Breymann, J. Barron *et al.* (1992) *Proc. ODP, Sci. Results*, 127/128: 577-601, College Station, TX (Ocean Drilling Program)
- 多田隆治・入野智久 (1994) 第四紀後期における日本海の海洋環境変化. 月刊地球, 16: 667-678
- Tada, R., Irino, T. and Koizumi, I. (1995) Possible Dansgaard-Oeschger oscillation signal recorded in the Japan Sea sediments. S. Tsunogai *et al.* (eds.) *Global fluxes of carbon and its related substances in the coastal sea*

- ocean-atmosphere system, *Proceedings of the 1994 Sapporo IGBP symposium*: 517-522
- Tada, R., Irino, T. and Koizumi, I. (1997 submitted) Land-ocean linkage in association with Dansgaard-Oeschger cycles recorded in the Late Quaternary sediments of the Japan Sea. *Paleoceanography*
- Taylor, K. C., Lamorey, G. W., Doyle, G. A., Alley, R. B., Grootes, P. M., Mayewski, P. A., White, J. W. C. and Barlow, L. K. (1993) The 'flickering switch' of late Pleistocene climate change. *Nature*, 361: 432-436
- Thouveny, N., de Beaulieu, J., Bonifay, E., Creer, K. M., Guiot, J., Icole, M., Johnsen, S., Jouzel, J., Reille, M., Williams, T. and Williamson, D. (1994) Climate variations in Europe over the past 140 kyr deduced from rock magnetism. *Nature*, 371: 503-506
- Tsunogai, S., Suzuki, T., Kurata, T. and Uematsu, M. (1985) Seasonal and areal variation of continental aerosol in the surface air over the western Pacific region. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 41: 427-434

Paleoenvironmental Changes in and around the Japan Sea since the Last Glacial Period

Ryuji Tada*

Late Quaternary hemipelagic sediments of the Japan Sea are characterized by cm to m scale rhythmical repetition of the dark and light layers. High-resolution analysis of sediment core from ODP Site 797 of south central Japan Sea revealed that these dark and light layers reflect millennial-scale paleoceanographic changes within the sea which are associated with large and abrupt climatic changes known as Dansgaard-Oeschger Cycles (DOC) which have recently been confirmed by analyses of ice cores from central Greenland. The dark layers depositions, which correspond to interstadials of the DOC, reflect increases in the relative contribution of East China Sea Coastal Water to the influx to the Japan Sea, conse-

quent decreases in the surface water salinity and reduction in deepwater production, and the increase in surface water productivity, whereas light layer depositions, which correspond to stadials of the DOC, reflect decreases in the relative contribution of East China Sea Coastal Water, consequent increases in surface water salinity and enhancement of deepwater production, and decreases surface water productivity. In addition, variation in the relative contribution of the East China Sea Coastal Water could have been caused by changes in the discharge from the Huanghe and Changjiang Rivers which should have reflected wet and dry cycles in Central Asia.

*Department of Geoscience, Graduate School of Science, University of Tokyo. 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113.