

## 柱状堆積物中のアルケノン組成による北部日本海の古海表面温度の復元

古宮正利\*

Masatoshi KOMIYA (1999) Paleotemperature assessment of the northern Japan Sea using alkenone in the sediment cores. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 50 (5/6), p. 321-327, 4 figs.

**Abstract:** Alkenones were analyzed for the sediment cores collected from the northern Japan Sea and fluctuation of paleo-SST (paleotemperature) were estimated from their composition. The estimated-SST from the sample near the top of each sediment core is consistent with observed modern SST. The sample collected from northern slope of Matsumae plateau indicates that estimated paleotemperature were relatively high throughout the maximum period of the last glacial time. After that, the paleotemperature were once decreased, and then increased toward the end of the glacial time. This fluctuation pattern generally resembles to the results of the other studies on several core sediments from a southern part of the Japan Sea. The fluctuation of paleotemperature from the sample collected from Japan Basin, north west of Matsumae plateau, is relatively large, and suggesting at different environmental fluctuation at this location.

### 要 旨

北海道西方沖の日本海で採取された柱状堆積物試料について、その中に含まれる長鎖アルケノンの分析を行い、古海表面温度（古水温）変遷の復元を試みた。各柱状堆積物試料の最頂部に近い試料の海表面温度推定値は、現在の海表面温度の実測値と矛盾しない結果を与えた。松前海台北側斜面で採取された試料の古水温推定値は最終氷期最盛期において比較的高く、その後氷期終焉にかけて低下した後、再び上昇して現在に至っていた。この古水温変動パターンは、より南部の日本海堆積物の研究による結果と全般的に一致した。一方それより北西に位置する日本海盆で採取された試料の古水温推定値は、比較的変動が大きく、この地点の環境変動が他の地点と異なっていたことを示唆している。

### 1. はじめに

生物から石油炭化水素の生成に至る一連の過程の中で最初の段階は、海洋表層に生息する植物プランクトンが死後、遺骸となって沈降、埋没していく過程である。それゆえ、まずはじめにこの植物プランクトンの発生量、すなわち基礎生産の多少が、炭化水素ポテンシャルの形成に影響を及ぼすひとつの要因と考えることができる。この海洋表層における生物の基礎生産を規制している主な要因は、水温、日照量、栄養塩濃度である。

近年、バイオマーカーと呼ばれる生物起源の有機化合

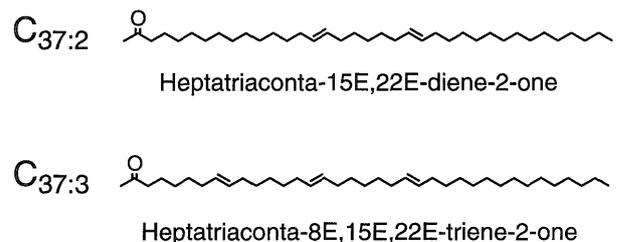
物を用いて、過去の環境（古環境）に関する情報を得る研究が盛んに行われるようになってきた。特に、堆積物に含まれるアルケノンと呼ばれる化合物の組成を調べるにより、過去の海表面温度を推定する研究が活発に行われ、成果を上げている（この分野の研究の詳細については、古宮・寺島, 1995を参照されたい）。これはアルケノンを生産する円石藻類である *Emiliania huxleyi* の培養実験から、アルケノンの組成を表すアルケノン不飽和度  $U^{k'_{37}}$  値と生育温度の間に極めて良い相関が成り立つことを原理としている。すなわち、

$$U^{k'_{37}} = [C_{37:2}] / ([C_{37:2}] + [C_{37:3}])$$

（ここで  $C_{37:n}$  は炭素数が37で二重結合が  $n$  個のアルケノンであり（第1図参照）、 $[ ]$  はそれぞれのアルケノンの濃度を表す。）とすると、

$$U^{k'_{37}} = 0.034T + 0.039 \quad (r^2 = 0.994)$$

（ $T$  は温度, °C）なる関係が成り立つ (Prahl *et al.*, 1988) ことが、一般に利用されている。



第1図 アルケノンの構造式。  
Fig. 1 Structure of alkenones.

\* 資源エネルギー地質部 (Mineral and Fuel Resources Department, GSJ)

Keywords: alkenone, paleotemperature, Japan Sea, sediment

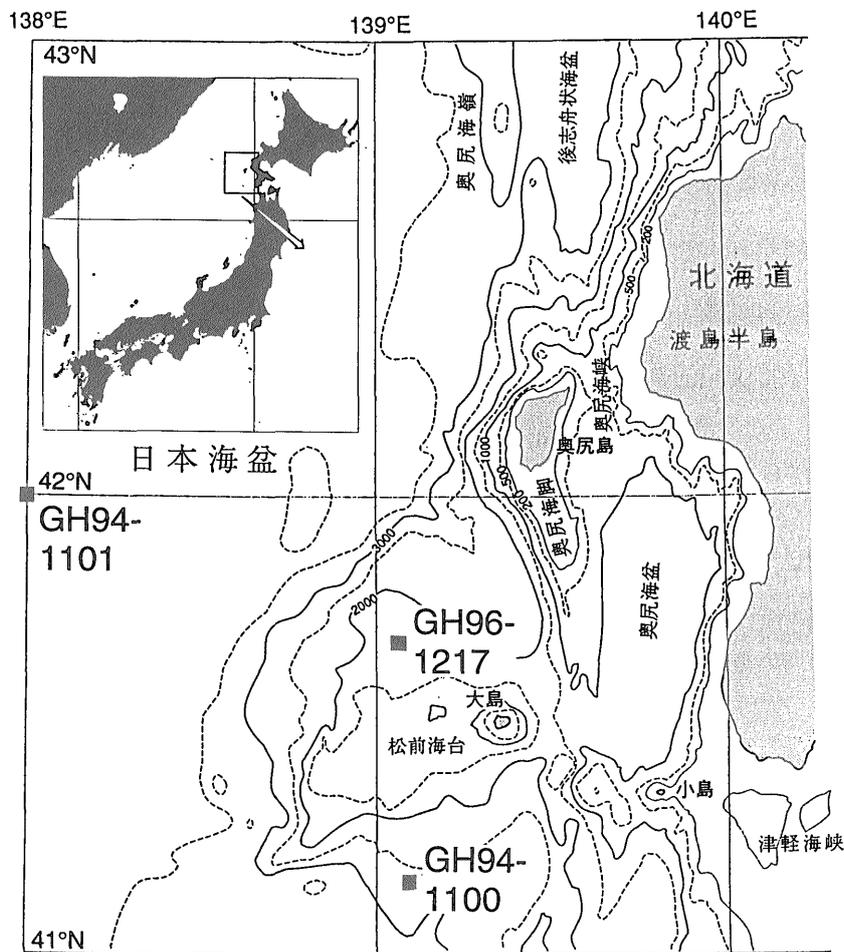
アルケノンによる古環境復元の手法は、大きな成果を上げる一方、ごく最近ではその問題点も指摘され始めている。たとえばアルケノンは *E. huxleyi* だけでなく、*Gephyrocapsa oceanica* によっても生産され、培養実験による結果では、*G. oceanica* のアルケノン不飽和度と水温との関係式は、*E. huxleyi* のそれと異なったものになるという (Volkman *et al.*, 1995)。また最近 *E. huxleyi* を使った培養実験でも、アルケノン不飽和度は水温だけでなく、栄養塩の濃度によっても影響を受ける可能性が示されている (Epstein *et al.*, 1998)。こうした事実は、アルケノン不飽和度から古水温推定値を換算する際に、*E. huxleyi* 以外のアルケノン生産者の寄与の程度や、栄養塩濃度の影響を、場合によっては加味して考慮しなければならないことを示している。

本研究では、北海道西方の日本海で採取された柱状堆積物を対象として、その中に含まれるアルケノンの組成を調べ、古海表面温度の変遷の復元を試み、その値の妥当性を考慮しつつ考察を行ったので、その結果について報告する。

## 2. 試料および分析方法

### 2.1 試料

試料として用いたものは、金属鉱業事業団所有の地質調査船白嶺丸 GH94 および GH96 航海によって北海道西方沖の日本海から採取された、3本の柱状堆積物試料(以下コア試料という)である。これらのコア試料の詳細は井内ほか (1995a, b) および池原・片山 (1997) により報告されているが、その概要は以下の通りである。試料の採取地点を第2図に示した。GH94-1100 (41°10'01"N, 139°04'49"E, 水深2523m) は、松前海台の南斜面の緩傾斜域である。試料長は227cmで、主としてシルト質粘土や粘土からなるが、火山灰・タービダイト砂薄層が多く挟まれている。深さ22-23cmと31-31.5cmに火山灰層が挟在し、上位のものが約800-900年前の白頭山-苫小牧火山灰 (B-Tm; 町田・新井, 1992) に、下位のものが、給源不明ながら日本海中一北部に広く分布する北日本2火山灰 (NJ2) と仮称されるもの (吉川, 1990) に対比される (吉川, 1995)。NJ2の年代は、<sup>14</sup>C年代測定からおおよそ17,000年前と推定されている (池原ほか, 1996)。両火



第2図 試料採取地点。  
Fig. 2 Sampling locations of sediment cores.

山灰層の間に、ハイエタスがあると考えられる。また日本海の広い範囲の堆積物には、約10,000年前に形成された TL1と最終氷期最盛期に堆積したとされる TL2の暗色層が認められているが、GH94-1100にはそれらの暗色層が挟在しているかどうかは、はっきりとは確認できなかった。GH94-1101(41°59'59"N, 138°00'01"E, 水深3638 m)は、松前海台の北西方向にあたる、日本海盆の中に位置する場所である。試料長は434cmであり、主としてシルト質粘土ないしシルトからなる。表層0-3 cmに挟在する火山灰層が前出の B-Tm であり、深度340-341.5cmに挟在する火山灰層が NJ2である。前述した TL1は、このコアの深さ314.5-318cmの暗色部に対比されると見られ、TL2は頂部が深度333.5cm、基底が343cmである可能性が高い。GH96-1217(41°41'54"N, 139°05'00"E, 水深1785m)は、松前海台の北側斜面の場所である。試料長は337cmで、一般的にシルト質粘土からなる。深度107-110cmに、有孔虫質の細葉理が発達した暗色層が認められ、これが TL1に対比される。これより下位は灰色系の粘土が挟在した後、深度137cmから暗色層が認められ、その下部は明色層と暗色層の互層となっているが、基底は顕著な葉理の消える深度210.5cmと考えられる。これが最終氷期最盛期に堆積したとされる TL2に対比される。

## 2.2 分析方法

コア試料は、採取後船上で上位から2 cm幅に分割し、分割した試料の一部を有機物分析用試料として採取し、これをただちに凍結して保存した。実験室に持ち帰った後、試料は凍結乾燥し、メノウ乳鉢を用いて粉末にした。

なお、CH96-1217は表層から深さ229cmまでの試料を使用した。これらの試料からトルエン/メタノール(6:4, v/v)によって可溶性有機物を超音波抽出し、抽出液を減圧濃縮し、精製水を加えた後ヘキサン/ジエチルエーテル(9:1, v/v)で中性成分を抽出した。この抽出液を無水硫酸ナトリウムで脱水し、シリカゲルカラムにより分画した。分画はヘキサン2 ml, ヘキサン/トルエン(3:1, v/v) 2 ml, トルエン4 ml, トルエン/メタノール(4:1, v/v) 4 mlを順に流すことにより行い、3番目のフラクションにアルケノン類が溶出してくるので、これを分析に用いた。化合物の同定は、ガスクロマトグラフ質量分析計(GC/MS)による開裂パターンの解析によって行った。定量はガスクロマトグラフ(GC)を使用して、n-ヘキサトリアコンタンまたはn-ヘプトトリアコンタンを用いた内部標準法により行った。使用した分析装置および分析条件の詳細は以下の通りである。

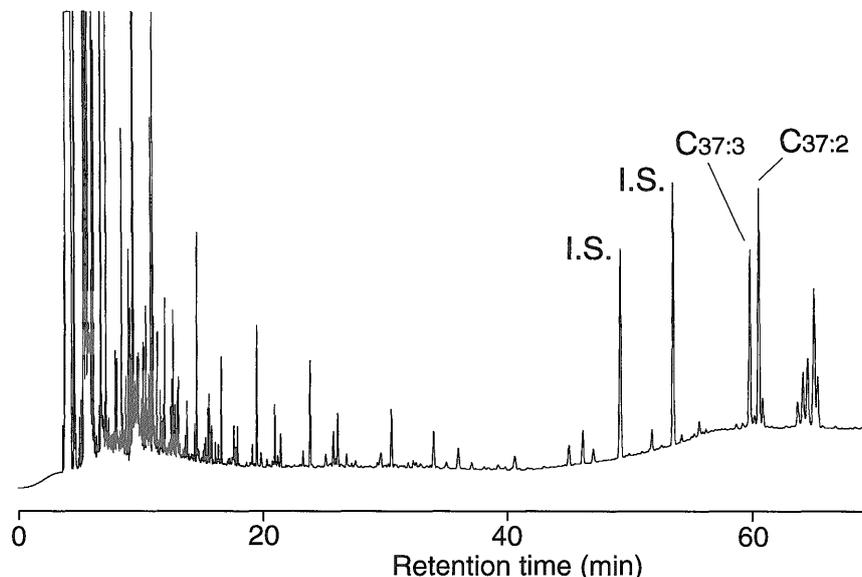
装置：GC/MS：HP6890+5972A MSD

GC：HP5890II, HP6890

分析条件 (GC, GC/MSとも)：Column：CP-Sil 5CB MS (0.25mm×60m). Column temp.: 70-280°C, 20°C/min., 30min. hold, 280-310°C, 2°C/min., 30min. hold. inj. press.: 31.5psi at 70°C, constant flow. Carrier gas: Helium

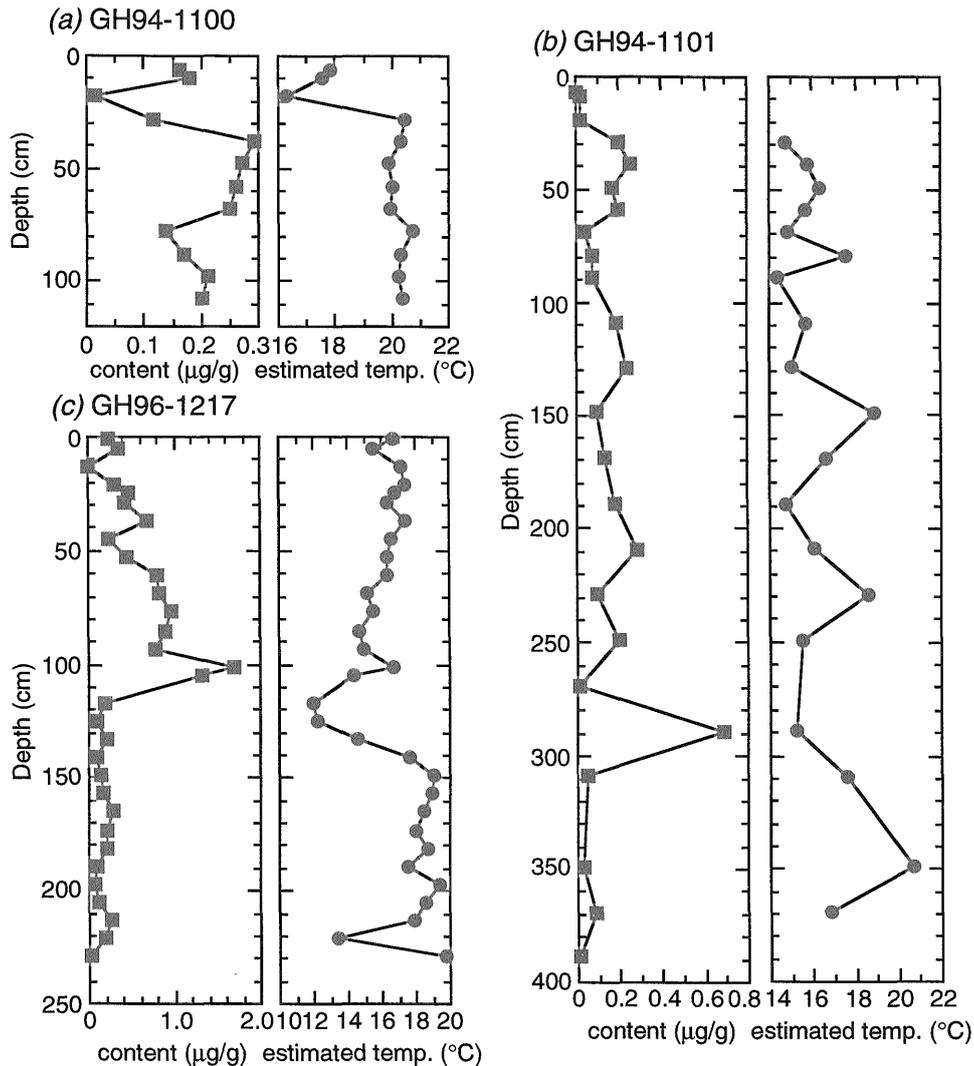
## 3. 結果と考察

得られたガスクロマトグラムの一例を第3図に示し、同定されたアルケノンのピークに化合物の略号を付し



第3図 日本海堆積物抽出液のアルケノンフラクションのガスクロマトグラム (I.S. は内部標準)。

Fig. 3 Typical gas chromatogram of alkenone fraction of the sediment from Japan Sea. (I.S. stands for the internal standard)



第4図 柱状堆積物中のアルケノン含有量 ( $C_{37:2}+C_{37:3}$ ) と古水温推定値。  
 Fig. 4 Vertical profiles of alkenone content ( $C_{37:2}+C_{37:3}$ ) and estimated paleotemperature for sediment cores.

た。略号で表される化合物の構造式は、前出の第1図に示されている。 $C_{37:2}$ と $C_{37:3}$ アルケノン定量し、これらの結果からアルケノン不飽和度(値)を計算し、これを前述した Prahl *et al.* (1988) の水温との相関式  $U^{37} = 0.034T + 0.039$  に当てはめ、古水温推定値を換算した。各コアのアルケノン含有量と、古水温推定値を深度に対してプロットしたものを第4図に示した。

### 3.1 表層試料についての古水温推定値の妥当性

アルケノンの分析によって得られた古水温推定値の妥当性を評価するために、まず各コアの頂部の試料についての結果が、現在の海表面温度の実測値と矛盾しないかどうかを検討した。

GH94-1100の、頂部に最も近い分析可能な試料は深度6cmであり、この試料の古水温推定値は17.9°Cであった。このコアは前述のように深度22-23cmにB-Tm火山灰が挟在していることから、深度6cmの試料は1000

年前より新しい試料である。一方GH94-1101の、頂部に最も近い深度7cmの試料とその下部にあたる深度9cmと19cmの試料はアルケノン含有量が検出限界に近いため、古水温推定値を計算することができなかった。深度29cmの試料が、古水温を推定できた最も上部の試料であり、その値は14.8°Cであった。このコアの深度0-3cmに挟在するB-Tm火山灰と、深度314.5-318cmに見られるTL1層の間を単純に堆積速度一定と仮定すると、深度29cmの試料は約1800年前の試料となる。GH96-1217は最頂部にあたる深度1cmの試料を分析し、その古水温推定値は16.7°Cであった。

一般に一年のうちでアルケノンが最も多く生産される時期はプランクトンブルームが発生する初夏であり、このときに海洋表層で生産されたアルケノンが、沈降粒子とともに海底表層堆積物に取り込まれると考えられている。各コア採取地点の6月の表層0mの海水温は、GH94-1100では14-15°C、GH94-1101では11-12°C、

GH96-1217では約14°Cである(海洋環境図 外洋編—北西太平洋II, 海洋資料センター編, 1978)。また同様に7月の表層海水温は, GH94-1100では20-21°C, GH94-1101では約18°C, GH96-1217では19-20°Cである。このように6月から7月にかけてこの海域では平均して約6°C表層海水温が上昇しているが, 3本のコアの頂部に近い試料の古水温推定値は, すべて6-7月の同地点の海水温実測値の範囲内に入っている。またこの海域の6月と7月において, GH96-1217を基準とすると, GH94-1100地点の海水温実測値はそれよりも0-1°C高く, GH94-1101は約2°C低い。コアの分析では, GH96-1217は16.7°Cであり, これと比べるとGH94-1100は17.9°Cで1.2°C高く, GH94-1101は14.8°Cで1.9°C低い。GH94-1100とGH94-1101は現在より1000-1800年ほど古い試料なので厳密には水温の補正が必要であろうが, 少なくとも各コアの最頂部に近い試料間で, 推定海水温の相対的な相違は, 実測値同士の値の相違と矛盾しない結果を与えている。

Ishiwatari *et al.*, (submitted) によると, 鳥取沖の隠岐堆で採取された柱状堆積物試料 KH79-3, L-3の表層7.5cmの試料に含まれるアルケノンの分析による推定海水温は, 19.1°Cを与えた。また宝達ほか(1996)によると, 秋田沖日本海で採取された柱状堆積物の最表層の試料中のアルケノン分析による推定海水温は, 約18°Cと報告されている。本研究で対象とした海域は, これらの地点よりも北方に位置していて, 堆積物表層から導かれる推定海水温はこれらの地点の値よりも低い。以上の点を総合して考えると, 本研究で得られた推定古水温は, 少なくとも堆積物表層において現在の海表面温度を反映した妥当な値であるといえる。

### 3.2 各柱状試料に含まれるアルケノンの概説

GH94-1100では, 18cmの深さの試料のアルケノン含有量が, その上下のものに比べて非常に少ない。深度18cmの試料は有機炭素量もその上下の試料に比べて非常に少ないことが報告されており(寺島ほか, 1995), こうした結果は, サンプルングの際にこのコアの表層に近い部分に一部乱れが生じ, 深度18cmの試料に, 22-23cm付近に入っているB-Tm火山灰の一部が混入してしまったためと考えられる。アルケノン含有量は深度108-38cmにかけて, 浅くなるに従い0.20-0.29 $\mu\text{g/g}$ と次第に増加するように見えてから, 深度18cmにかけて急激に減少し, それより浅いところで0.16-0.18 $\mu\text{g/g}$ となる。古水温推定値は18cmより下位で19.7-20.7°C, 上位で17.6-17.9°Cと異なっていた。これは前述のように深度23-31cmの間にハイエタスがあり, GH94-1100の試料が時間的に連続したものでないのハイエタスの上下で年代が大きく異なっていて, 環境にも違いがあったためではないかと考えられる。

GH94-1101では, アルケノン含有量は全般的に0.28 $\mu\text{g/g}$ 以下であるが, 289cmの試料だけが0.69 $\mu\text{g/g}$ と突出して高い。しかし289cmの試料は有機炭素量が1.32%であり, 有機炭素量が試料全体で0.46-1.63%の範囲に収まること(寺島ほか, 1995)から, この層準の試料の有機炭素量が特に多いというわけではないので, 高いアルケノン含有量は, 有機炭素量の多少と特に関係がないと見られる。古水温推定値は, 14.4-20.7°Cの範囲で深度によって比較的大きく変動していた。深度314.5-318cmの暗色層がおよそ10000年前のTL1であるとする, 上位と下位で, 古水温推定値が全般的に異なる傾向を示すことが予想されるが, 水温のばらつきが大きく, そのような傾向は観察されない。

GH96-1217では, アルケノン含有量は, 全体的に他の2本のコアと比べて多い。深度125-229cmではアルケノン含有量は0.28 $\mu\text{g/g}$ 以下で低いが, その上部で急激に増加し, 深度101cmで1.68 $\mu\text{g/g}$ と最大になる。それより上部の試料では, 深度13cmの試料を除くと, 浅くなるに従い0.23-0.97 $\mu\text{g/g}$ の範囲でばらつきながらも次第に減少していた。101cmおよび105cmの試料のアルケノン含有量はそれぞれ1.68 $\mu\text{g/g}$ , 1.32 $\mu\text{g/g}$ と非常に高いが, これらの試料の有機炭素量はそれぞれ2.18%, 2.76%と, その上下と比べて明らかに高く(93cmは1.49%, 117cmは1.24%)(寺島ほか, 1998), これは107-110cmに認められるTL1が高い有機炭素量を持つことと関係していると考えられる。古水温推定値は, TL2の層準では, 氷期に当たるにもかかわらず17.6-19.5°Cと全般的に高い値を示しており, これが大きな特徴である。TL2の上部で古水温推定値は次第に低下し, 深度117cmで12.0°Cと最も低くなった。それより浅い試料では, TL1上部の深度101cmにかけて古水温推定値は急激に上昇し, 以降14.7-17.4°Cの範囲に収まっていた。

### 3.3 GH96-1217の古水温推定値の解釈

GH96-1217のアルケノンの分析結果は, これより南の日本海堆積物についての結果と全体的に類似している。鳥取沖の隠岐堆で採取された柱状堆積物試料, KH79-3, L-3に含まれる有機物について分析が行われた(Ishiwatari *et al.*, submitted)。それによると, この地点ではおよそ22000年前から10000年前にかけてアルケノン含有量( $C_{37:2}$ と $C_{37:3}$ アルケノンの総量)は0.39 $\mu\text{g/g}$ 以下で少なく, それより上位にかけて急激に増加し, TL1層直上の9900年前に1.66 $\mu\text{g/g}$ の極大を示し, それ以降は1.18-2.08 $\mu\text{g/g}$ の範囲で変動している。古水温推定値は, TL2層上部の約15000年前で18.6°Cと高いが, 10000年前にかけて約4°C低下した後, 9900年前に19.3°Cまで急激に上昇し, 以降ほぼ18-19°Cの範囲を変動している。同様の結果が, 秋田沖の日本海柱状堆積物についても観察されている(宝達ほか, 1996)。GH96-1217と隠岐堆,

秋田沖の試料の結果に共通してみられることは、TL2の層準で古水温推定値が高いこと、TL2から TL1にかけて一旦水温は低下し、その後上昇、以降多少の変動をしながらも大体一定の値となることである。また TL1より以前の氷期でアルケノン含有量が全体的に低いことも、GH96-1217と隠岐堆の試料で共通してみられる。

Oba *et al.* (1991), 多田 (1997), 池原 (1998) によると、日本海古環境の変遷はおおむね次のようにとらえられている。すなわち海水準の低下した23000年前から15000年前にかけて、低塩分濃度の水が表層を覆い、海水の鉛直循環が停止して還元的な海底環境が形成され厚い暗色層 (TL2) が堆積した。その後津軽海峡から親潮が流入し、海底環境は酸化的に変化した。そして約10000年前、黒潮の勢力の増加に伴い対馬海流が流入し、親潮の流入は後退して、この時期に TL1層が形成された。その後現在まで対馬海流の流入が引き続いている。

GH96-1217の結果を、これら一般的な日本海環境の変遷の見方と照らし合わせてみると、TL2上部から TL1下部にかけて古水温推定値が低下することは、津軽海峡からの親潮の流入によって海水温が低下したことを意味していると考えられる。その後 TL1上部にかけての急激な古水温推定値の上昇は、暖かな対馬海流の流入の影響ととらえられるであろう。しかしながら、TL2層で全体的に古水温推定値が18-20°C程度と高いことは、どのように説明できるであろうか。確かに親潮流入以前の日本海は、外部からの顕著な海流の流入はなく、半ば閉じた状態としてその表層を低塩分濃度の水が覆っていた。そのため、親潮流入以降の時期と比べると、その海表面温度はある程度高かったであろうことは想像できる。しかし最終氷期最盛期において、18-20°Cという高い海表面温度が実際に存在していたかどうかは、前述のように、アルケノンを生産する藻類が現在と同じであったか、水温以外の他のパラメーターがアルケノン組成に影響を及ぼした可能性はないか、等を考慮してさらに詳しく検討しなければならないと考える。GH96-1217の TL2の層準において示された高い古水温推定値の妥当性については、今後他のバイオマーカー等の分析結果と併せて考えていかなければならないが、いずれにしてもこの現象は、隠岐堆-秋田沖-北海道西方沖 (松前海台) に至る日本海の広域で起こった現象であるといえる。

### 3.4 GH94-1101の古水温推定値の解釈

GH94-1101は前述のように、古水温推定値とアルケノン含有量が氷期・間氷期のサイクルと一見無関係に変動しており、これは他の日本海試料では見られない特徴である。古水温推定値が妥当なものであるかどうか、3.3節でも説明した点を併せて考察しなければならないが、現時点では他のバイオマーカーについての分析結果や、無機・化石についてのデータもないので、妥当性について

判断することは難しい。しかしいずれにせよ、GH94-1101は最終氷期以降においても、他の地点と異なる (水温も含めて) 環境変動を経験している、それがアルケノンの結果に反映されたのではないかと推察できる。

## 4. ま と め

北海道西方沖で採取された3本のコア試料に含まれるアルケノンの分析を行い、古水温変遷の復元を試みるとともに、その結果について考察を行った。

1) 松前海台南側で採取された GH94-1100 コアは、ハイエタスが存在して連続した試料でないため、ハイエタスの上下で古水温推定値は系統的に異なっていた。

2) 松前海台北西方の日本海盆で採取された GH94-1101 コアの古水温推定値は、やや幅広い温度範囲で変動していた。これは他の日本海試料の研究例では見られない特徴で、このコアが最終氷期以降も他の地点と異なる環境変動を経験したものと推測できる。

3) 松前海台北側で採取された GH96-1217 コアの古水温推定値は、最終氷期最盛期に堆積した TL2を通して 17.6-19.5°C と高い。その後一旦水温は 12.0°C まで低下しており、これは津軽海峡からの親潮の流入と対応している。そして TL1 上部にかけて再び水温は上昇している、これは対馬海流の流入と対応していると解釈した。GH96-1217 コアの結果は、これより南部日本海の他の研究結果 (Ishiwatari *et al.*, submitted; 宝達ほか, 1996) と全般的に類似している。

GH96-1217 コアの TL2 において古水温推定値が高いという結果は、この時期において日本海広域で表層水の温度が確かに高かったのか、それともアルケノン組成に影響を及ぼす何らかの因子がこの時期に変化していたため、見かけ上水温が高く推定されてしまったのかは、今後他のバイオマーカーの分析も含めて詳細に検討していかなければならない問題である。

謝辞 本研究は、工業技術院特別研究「島弧型炭化水素ポテンシャルの形成機構と予測手法に関する研究」の一環として実施された。グループ長である徳橋秀一博士には多大なるご助言、ご協力をいただいた。また、工業技術院特別研究「北海道西方海域の環境変動に関する総合的研究」によって実施された白嶺丸による調査航海、GH94およびGH96航海に同乗させていただき、試料の採取をさせていただいた。地質調査所海洋地質部 (現愛媛大学理学部教授) 井内美郎博士、地質調査所海洋地質部岡村行信博士、倉本真一博士、片山 肇博士、科学技術特別研究員 (現琉球大学講師) 本山 功博士をはじめとする調査航海の乗船研究者、ならびに白嶺丸乗組員の方々には多大なるご協力をいただいた。また同じく乗船

研究者である海洋地質部池原 研博士には、初期の草稿を読んでいただき、貴重なご意見、ご協力をいただいた。試料の分析には、井上和子氏、尾台明日香氏、保坂博子氏にご協力をいただいた。以上の方々にここに記して感謝したい。

## 文 献

- Epstein, B.L., D'Hondt, S., Quinn, J.G., Zhang, J. and Hargraves, P.E. (1988) An effect of dissolved nutrient concentrations on alkenone-based temperature estimates, *Paleoceanography*, **13**, 122-126.
- 宝達美香・石渡良志・山田桂太・松本公平 (1996) 日本海堆積物中のアルケノン：過去3万年間における表面海水温度の変動。日本地球化学会講演要旨集1996, 233.
- 池原 研・片山 肇・中嶋 健 (1996) 日本海中部一南東部から採取された柱状試料の加速器質量分析法による炭素14年代。地質調査所月報, **47**, 309-316.
- 池原 研・片山 肇 (1997) GH96航海で採取された堆積物柱状試料の岩相。北海道西方海域の環境変動に関する総合的研究 平成8年度研究概要報告書, 117-126, 地質調査所
- 池原 研 (1998) 縁海の古海洋学一縁海の海洋環境変動とその重要性一。地学雑誌, **107**, 234-257.
- 井内美郎・本山 功・片山 肇・菅 和哉 (1995a) 北海道南西沖の柱状堆積物試料。北海道西方海域の環境変動に関する総合的研究 平成6年度研究概要報告書, 105-114, 地質調査所
- 井内美郎・大塚雅之・公文富士夫・本山 功・片山 肇 (1995b) 北海道南西沖海域の表層堆積物。北海道西方海域の環境変動に関する総合的研究 平成6年度研究概要報告書, 63-88, 地質調査所
- Ishiwatari, R., Yamada, K., Matsumoto, M., Houtatsu, M. and Naraoka, H. (submitted) Organic molecular and carbon isotopic records of the Japan Sea in the past 30kyr. *Paleoceanography*
- 海洋資料センター編 (1978) 海洋環境図 外洋編一北西太平洋II。日本水路協会, 東京, 157p.
- 古宮正利・寺島美南子 (1995) 有機化合物による古水温の復元。地質ニュース, **495**, 25-30.
- 町田 洋・新井房夫 (1992) 火山灰アトラス [日本列島とその周辺]。東京大学出版会, 東京, 276p.
- 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*, **5**, 499-518.
- Prahl, F.G., Muehlhausen, L.A. and Zahnle, D.L. (1988) Further evaluation of long-chain alkenones as indicators of paleoceanographic conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 2303-2310.
- 多田隆治 (1997) 最終氷期以降の日本海および周辺域の環境変遷。第四紀研究, **36**, 287-300.
- 寺島 滋・井内美郎・片山 肇 (1995) 日本海盆東縁部から得られた堆積物柱状試料における重金属等の鉛直変化。北海道西方海域の環境変動に関する総合的研究 平成6年度研究概要報告書, 197-202, 地質調査所
- 寺島 滋・井内美郎・池原 研 (1997) 北海道周辺海域から採取された柱状試料中の重金属等濃度の鉛直変化。北海道西方海域の環境変動に関する総合的研究 平成8年度研究概要報告書, 182-193.
- 寺島 滋・池原 研・中嶋 健・片山 肇・井内美郎・横田節哉・今井 登 (1998) 日本海東部の海底堆積物中の元素濃度の鉛直変化と堆積環境。地調月報, **49**, 201-235.
- Volkman, J.K., Barrett, S.M., Blackburn, S.I. and Sikes, E.L. (1995) Alkenones in *Gephyrocapsa oceanica*: Implications for studies of paleoclimat. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **59**, 513-520.
- 吉川清志 (1990) ICP 発光分析を用いたテフラの同定法とその応用。地学雑誌, **99**, 743-758.
- 吉川清志 (1995) GH94航海により得られた北海道南西沖のテフラ (火山灰) の対比と編年。北海道西方海域の環境変動に関する総合的研究 平成6年度研究概要報告書, 145-150, 地質調査所

(受付：1998年9月28日；受理：1999年2月18日)