

古水温変動からみた北太平洋の軌道強制力に対する応答

山本正伸

北海道大学大学院地球環境科学研究院

Response of the North Pacific to orbital forcing during late Quaternary from the view of paleotemperature records

Masanobu Yamamoto

Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, Kita-10, Nishi-5, Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan
(myama@ees.hokudai.ac.jp)

Abstract. We present a palaeoceanographic perspective of the North Pacific during the last two glacial cycles based on U_{37}^K -derived palaeotemperature records from Japan and California margins. At the Japan margin, the sea surface temperature (SST) in the Kuroshio-Oyashio transition has varied in response to precessional cycle. At the California margin, SST has varied in response to ice volume changes, but the SST difference between inshore and offshore sites ($\Delta SST_{\text{NEP}} = SST_{\text{ODP1014}} - SST_{\text{ODP1016}}$) has responded to precessional cycle. Comparison of ΔSST_{NEP} and the $SST_{\text{MD01-2421}}$ of the central Japan margin revealed anti-phase variation; high ΔSST_{NEP} (indicating weakening of the California Current) corresponded to low SST at the Japan margin (indicating the southward displacement of the north-western Pacific subarctic boundary and weakening of the Kuroshio Extension), and vice versa. This finding suggests that the intensity of the North Pacific subtropical gyre circulation has varied in response to precessional forcing.

Key words: Pleistocene, glacial-interglacial cycles, North Pacific, subtropical gyre, Kuroshio, marine core, paleotemperature, alkenone, precession.

はじめに

北太平洋中緯度の海洋環境は、海洋表層の流れである亜熱帯循環と亜寒帯循環の変動に規制されている(図1A)。この海洋循環は、Pacific Decadal Oscillation (PDO; Mantua *et al.*, 1997; Minobe, 1997) と North Pacific Gyre Oscillation (NPGO; Di Lorenzo *et al.*, 2008) という10年スケール変動を示す。PDOは北太平洋北緯20°以北の海面水温変動をEOF(Empirical Orthogonal Function)解析して得られた第一主成分の変動であり、亜寒帯循環の変動を表す。他方、NPGOは北東太平洋の北緯25°~62°、西経110°~180°の範囲の海面高度変動をEOF解析して得られた第二主成分の変動であり、亜熱帯循環とアラスカ沖循環の変動を表す。PDOとNPGOの変動の一部はエルニーニョ南方振動(El Niño-Southern Oscillation; ENSO)に由来する(Dettinger *et al.*, 2001; Di Lorenzo *et al.*, 2008)。

このような北太平洋全域を支配する変動が長時間スケールにおいても成立しているならば、北太平洋中緯度の日本列島や北米大陸東岸の古気候変動は、互いに対応し、かつ全球的あるいは北半球スケールの気候変動とリンクしていたことが想像される。しかしながら、北太

平洋全域規模の気候変動に関するわれわれの理解はまだ不十分である。これまで、北西太平洋では、黒潮・親潮境界は氷期に南下し、間氷期に北上すると考えられていた(Thompson and Shackleton, 1980; Moore *et al.*, 1980; Thompson, 1981 など)。また、北東太平洋では、カリフォルニア海流強度はローレンタイド氷床の発達と関係があると考えられていた(Kutzbach and Wright, 1985; Lyle *et al.*, 1992; Dooze *et al.*, 1997; Mangelsdorf *et al.*, 2000; Herbert *et al.*, 2001)。しかし、最近になり、北太平洋中緯度縁域の水溫変動は北太平洋の亜熱帯循環の変動を反映していると考ええると、理解が容易であることが示された(Yamamoto *et al.*, 2004; 2005; 2007b)。この新見解は、Yamamoto (2009)、山本 (2009)、山本ほか (2009) に総説としてまとめられている。本報では、日本近海とカリフォルニア沖のアルケノン水溫に関する既存データを取りまとめ、海洋学的解釈を行い、北太平洋亜熱帯循環の氷期・間氷期変動を解説する。

アルケノン古水温復元法

アルケノンはある種のハプト藻に含まれる生体脂質である(図2; Volkman *et al.*, 1980)。これまで、アルケ

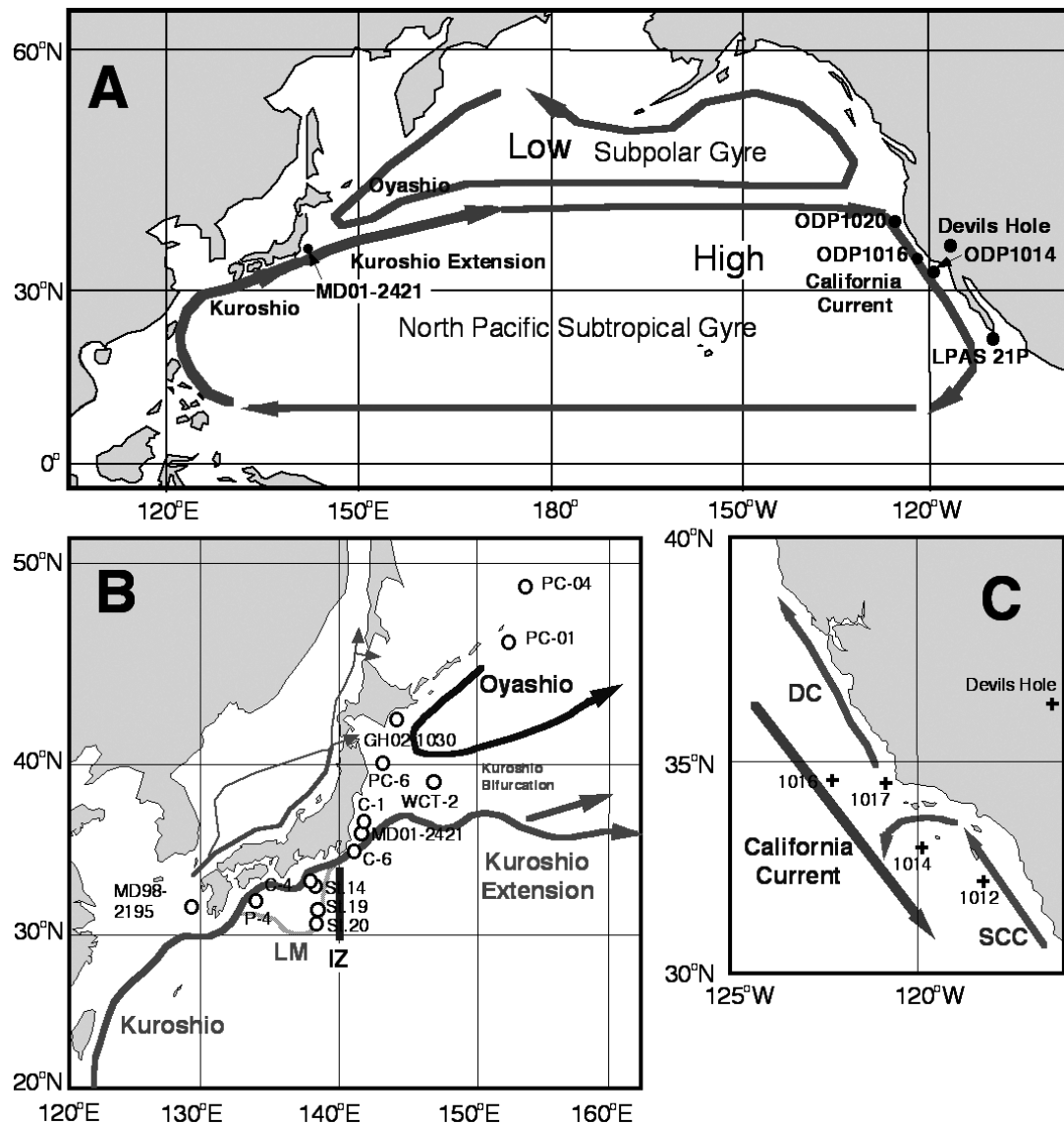


図 1. (A) 北太平洋の表層流, (B) 黒潮・親潮海流系, (C) カリフォルニア海流系と本論文で議論される研究地点. High = 北太平洋高気圧; Low = アリューシャン低気圧; LM = 黒潮の大蛇行経路; IZ = 七島・硫黄島海嶺; DC = デイビッドソン海流; 南カリフォルニア反流.
Fig. 1. Map showing (A) surface currents in the North Pacific, (B) Kuroshio and Oyashio current system, (C) California Current system, and the locations of sites discussed in this paper. High = North Pacific High; Low = Aleutian Low; LM = large meander path of the Kuroshio; IZ = Izu Ridge (Shichito-Iwoto Ridge); DC = Davidson Current; SCC = Southern California Countercurrent.

ノンはハプト藻綱の中の Gephyrocapsae 科の *Emiliania* 属, *Gephyrocapsa* 属と Isochrysidaceae 科の *Chrysotila* 属, *Isochrysis* 属の 2 科 4 属からしか検出されていない (Marlowe *et al.*, 1984, 1990; Volkman *et al.*, 1995).

アルケノン古水温計は, 不飽和数の異なる分子の量比が生育温度に応じて変化することを利用する. 不飽和の程度を表す指標 (不飽和指標) として U_{37}^K 値 (Unsaturated Ketone of 37 carbons の意) が用いられる. この算出方法 (Brassell *et al.*, 1986; Prahl *et al.*, 1988) は以下の通りである.

$$U_{37}^K = [C_{37:2}Me] / ([C_{37:2}Me] + [C_{37:3}Me])$$

但し, $[C_{37:2}Me]$ は C_{37} 二不飽和アルケノン, $[C_{37:3}Me]$ は C_{37} 三不飽和アルケノン, 37:2 の 37 は炭素数を, :2 は不飽和の数を表し, Me はメチルケトンであることを表す.

米国オレゴン州立大学の Prahl らによって, *E. huxleyi* の培養実験が行われ, 生育水温とアルケノン不飽和指標の間に良い相関関係があることが示された (Prahl and Wakeham, 1987; Prahl *et al.*, 1988). その関係は以下の式で表される.

$$U_{37}^K = 0.034T + 0.039 \quad (r^2 = 0.994), \quad T = \text{生育温度 (}^\circ\text{C)}$$

上記の換算式を用いて堆積物中のアルケノン不飽和指標

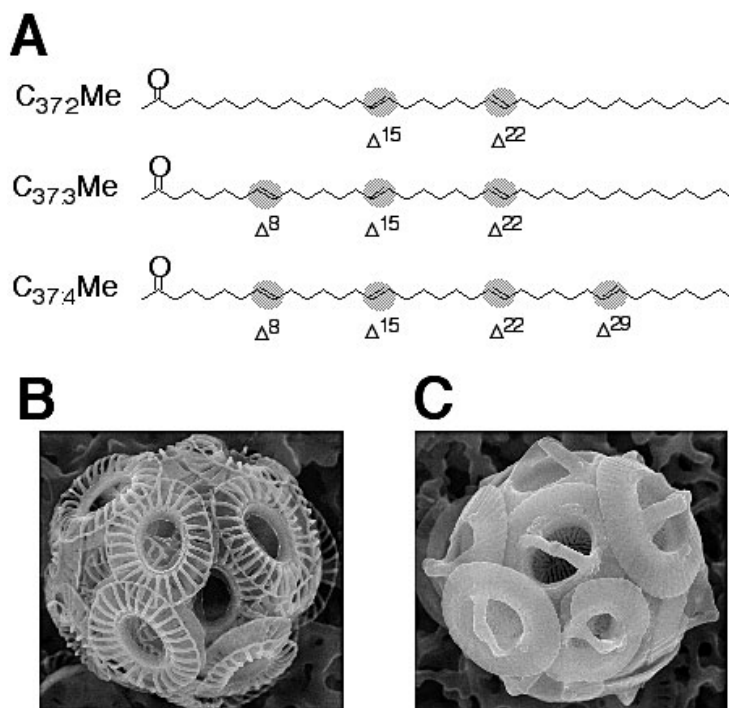


図2. (A) アルケノンの例, $C_{37:2}Me$ = ヘプタトリアコンタ -15E, 22E- ジエン -2- オン, $C_{37:3}Me$ = ヘプタトリアコンタ -8E, 15E, 22E- トリエン -2- オン, $C_{37:4}Me$ = ヘプタトリアコンタ -8E, 15E, 22E, 29E- テトラエン -2- オン, (B) アルケノン生産者 *Emiliana huxleyi* と (C) *Gephyrocapsa oceanica* (写真は萩野恭子博士提供.).

Fig. 2. (A) Examples of alkenones, $C_{37:2}Me$ = heptatriaconta-15E, 22E-dien-2-one, $C_{37:3}Me$ = heptatriaconta-8E, 15E, 22E-trien-2-one, $C_{37:4}Me$ = heptatriaconta-8E, 15E, 22E, 29E-tetraen-2-one, (B) alkenone producers *Emiliana huxleyi* and (C) *Gephyrocapsa oceanica* (Photographs were provided by Dr. Kyoko Hagino.)

からアルケノンが生産された場の水温を推定することができる。アルケノンを生産するハプト藻の多くは、0～30 m 深の海面近くに多く生育するため、アルケノンの記録する水温は、概ね海面温度を反映すると考えられた (Prahl and Wakeham, 1987)。

セジメントトラップ実験

中緯度海洋においては水温の季節変動が大きく、夏季には温度躍層が発達するため、ハプト藻の記録する水温は、その生産季節や水深に依存する。したがって、復元された水温を解釈するには、ハプト藻がアルケノンを生産した季節と水深を適切に推測することが重要である。現在の海洋において、アルケノン不飽和指標の示す水温が、どの季節のどの水深の水温であるのかを明らかにするには、セジメントトラップ実験を行い、沈降粒子中のアルケノン不飽和指標を調べ、その地点での水温の季節的鉛直分布と比較するのが適切である。これを目的として、北西太平洋の黒潮域では Sawada *et al.* (1998) が、親潮域では Harada *et al.* (2006) が、黒潮・親潮混合域では Yamamoto *et al.* (2007a) が、セジメントトラップ試料のアルケノン分析を行った。

Yamamoto *et al.* (2007a) が実験を行った WCT-2 地点は、黒潮前線と親潮前線のほぼ中間に位置する (図1B)。

この地点での月平均海面温度は約9℃ (3月) から約24℃ (8月) の範囲で変動し、年平均温度は約15℃である (Conkright *et al.*, 2002)。この地点の水温の季節変動は、黒潮・親潮境界の季節的南北移動と温度躍層の発達により生じる。温度躍層は夏から秋に発達する。

アルケノン沈降フラックスは明瞭な季節変動を示す。沈降フラックスは11月から3月までは小さく、4月から10月までは大きい (図3)。アルケノン不飽和指標が示す水温は、約12℃ (4～5月) から24℃ (10月) の範囲で変動し、フラックス加重平均水温は約15℃である (図3)。フラックスの小さい11月から3月では、アルケノン水温は海面温度よりも高い (図3)。アルケノンの炭素同位体比の変動から、この期間のアルケノンは晩夏から初秋に生産されたアルケノンが、徐々に沈降してきたものであると解釈される (Yamamoto *et al.*, 2007a)。フラックスの大きな4月から10月では、アルケノン水温 (U_{37}^K 値から求められた水温値) は海面温度よりも低い (図3)。フラックスの高い8月において、トラップに捕集されたアルケノンの示す水温と、実際の水温の深度分布を比較したところ、アルケノン水温は水深30 mの季節温度躍層の水温と一致した。このことから、この海域のアルケノン水温は、夏の温度躍層を反映している可能性が高いと考えられる。

カリフォルニア沖では, Prahl *et al.* (1993) が東部北太

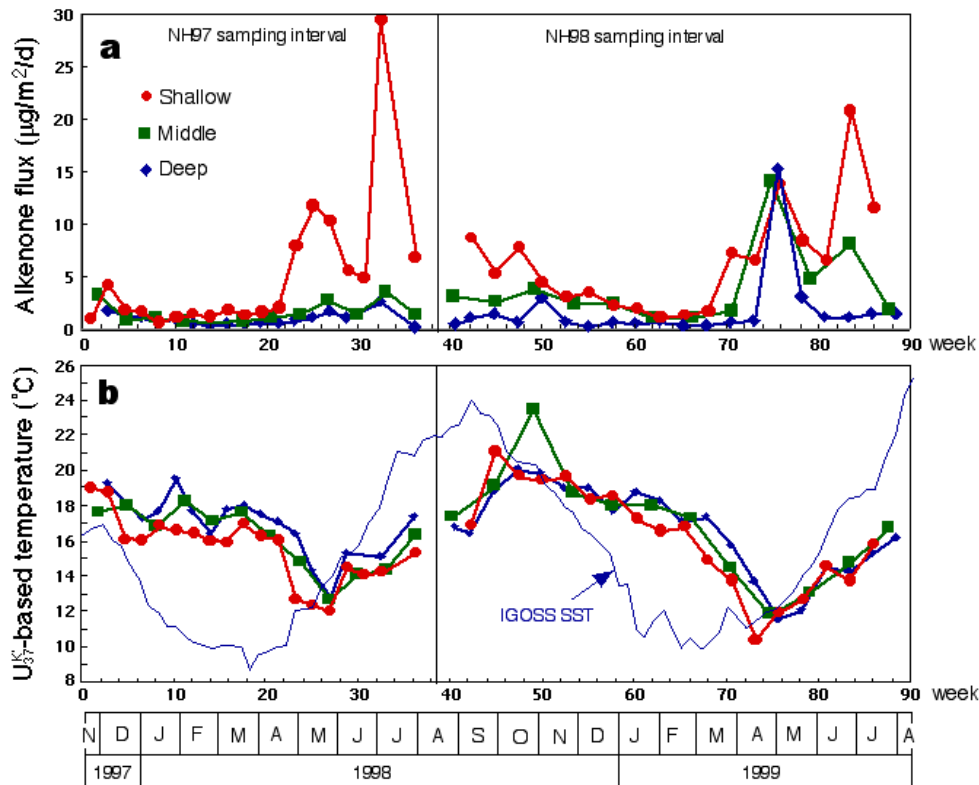


図3. 北緯39度東経147度地点の1997年11月から1999年8月までの間のアルケノン沈降フラックスとアルケノン水温 (U_{37}^K から求められた水温値) の変動 (Yamamoto *et al.*, 2007a). IGOSST 週間海面温度データは Reynolds *et al.* (2002) より. トラップ水深; Shallow = 1300 m, Middle = 2500 ~ 3000 m, Deep = 4800 m.

Fig. 3 Changes in (a) sinking flux of alkenones and (b) U_{37}^K -based temperature from November 1997 to August 1999 (Yamamoto *et al.*, 2007a). The IGOSST weekly SSTs at 39°N, 147°E are from Reynolds *et al.* (2002). Trap depth; Shallow = 1300 m, Middle = 2500-3000 m, Deep = 4800 m.

平洋カリフォルニア海流を横断するトランセクトで水深1000 mのセジメントトラップ試料のアルケノン进行分析した。どのサイトでも5~7月でアルケノンフラックスが最大になった。アルケノン不飽和指標の示す水温は年間を通じてほぼ一定であるが、5~7月のアルケノン水温は他に比べて顕著に低かった。アルケノン水温は、夏の温度躍層の温度と冬の海面温度に一致する。晩夏におけるクロロフィル極大は水深50 m付近の上部温度躍層にあり、アルケノン水温は夏の温度躍層の温度を反映している可能性が高いと判断された。

北西太平洋日本列島沖

北西太平洋中緯度域を流れる主要な海流は、黒潮および黒潮続流と親潮である (図1B)。本州東岸において、親潮と黒潮続流は混合し、混合域を形成している。黒潮続流の北縁を黒潮前線、親潮の南縁を親潮前線と呼ぶ。混合域では、黒潮続流から分離した暖水渦と親潮から分離した冷水渦がモザイク状分布を示す。この混合域での海面水温の緯度勾配は、緯度1度あたり約1.6℃と高い (海洋資料センター, 1975)。

1970年代から1980年代初頭にかけて、北西太平洋から採取されたコアの微化石群集組成の分析が行われ、黒潮続流・親潮境界の変動が議論された。Thompson and Shackleton(1980)は、黒潮および黒潮続流域から採取された3本のコアについて、過去15万年間の浮遊性有孔虫 *Neogloboquadrina pachyderma* 左巻き個体の産出頻度変化を調べ、氷期では、*N. pachyderma* 左巻き個体の産出頻度が高く、黒潮続流・親潮境界が南下した可能性を指摘した。また、Thompson (1981)は、中低緯度西太平洋から採取された186本のコアの浮遊性有孔虫群集組成を調べ、変換関数法により水温に換算し、氷期における黒潮続流・親潮境界の南下を示した。さらに、Moore *et al.*(1980)は、浮遊性有孔虫、放散虫、珪藻、石灰質ナノ化石の群集組成から変換関数法により太平洋全域の海面水温を復元した。この復元でも、最終氷期最盛期 (Last glacial maximum; LGM) での黒潮続流域での水温低下は大きく、亜寒帯境界の低緯度方向へのシフトが指摘された。その後、Chinzei *et al.* (1987)らは、日本列島の南岸および東岸の3本のコアの浮遊性有孔虫、珪藻、石灰質ナノ化石、放散虫の群集組成 (微化石温度指標 [黒潮指標種/黒潮指標種+親潮指標種の産出頻度比]) の変化を調べ、遠州灘沖の

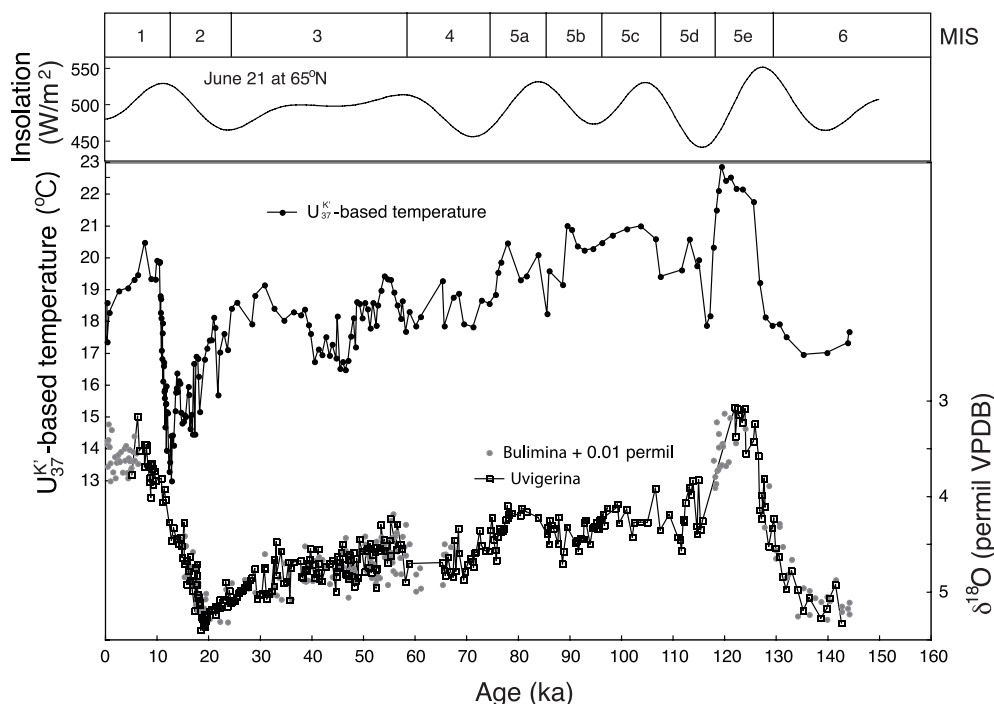


図4. 過去14.4万年間のMD01-2421地点におけるアルケノン水温 (Yamamoto *et al.*, 2004; 2005) と底生有孔虫 *Uvigerina* と *Bullimina* の $\delta^{18}\text{O}$ 値 (Oba *et al.*, 2006) の変化。 U_{37}^k 値から水温への換算は、培養実験にもとづき得られたキャリブレーション式を用いて行われた (Prahel *et al.*, 1988)。北緯65°の6月21日の日射量を比較のため示した。図はYamamoto (2009) より。

Fig. 4. Changes in U_{37}^k -derived temperature (Yamamoto *et al.*, 2004; 2005) and $\delta^{18}\text{O}$ of the benthic foraminiferans *Uvigerina* and *Bullimina* (Oba *et al.*, 2006) at Site MD01-2421 during the last 144 kyr. The temperatures were calculated using an equation obtained by a culture-based calibration (Prahel *et al.*, 1988). The June 21 insolation at 65°N is shown for comparison. After Yamamoto (2009).

C-4 コアにおいて、約2万年前に完新世よりも親潮指標種に富むことから、氷期に黒潮前線が南下し、親潮が日本列島南岸にまで及んでいたと考えた。この解析結果から、黒潮前線は16.2 ka から7.5 ka にかけて北上したと考えられた。大場・安田 (1992) も、四国沖 P-4 コアの浮遊性有孔虫と底生有孔虫の酸素同位体比の変動から、親潮水の特徴を持つ親潮潜流が四国沖に流入していたことを示唆し、Chinzei *et al.* (1987) の見解を支持した。他方、尾田・嶽本 (1992) は、遠州灘 C-4 コアと四国沖 P-4 コアに出現する *Neogloboquadrina incompta* を黒潮大蛇行時に形成される冷水塊の指標であると仮定し、両コアにみられる黒潮指標種の減少は、黒潮前線の南下ではなく、大蛇行頻度が高まったことによると解釈した。さらに、黒潮指標種の産出頻度比はLGMで極小にはならず、1.4～1.5万年前 (^{14}C 年代) で極小であり、そのときももっとも高頻度で大蛇行が生じたことを示唆した。同様な見解はSawada and Handa (1998) による伊豆七島海嶺の St. 14, 19, 20 コアのアルケノン古水温変動の解釈にも用いられた。

鹿島沖 MD01-2421 コア

2001年6月、国際海洋全球変化研究 (IMAGES) 第7次航海において Marion Dufresne 号を用いて、茨城県鹿

島沖東方100kmの地点 (北緯36°02′, 東経141°47′) で長尺ピストンコア MD01-2421 が採取された (図1B)。コア採取地点は、黒潮前線の近くに位置する。このコアの年代モデルは、浮遊性有孔虫の放射炭素年代、テフラ年代、底生有孔虫酸素同位体層序により確立された (Oba *et al.*, 2006)。

このMD01-2421地点では、過去14.4万年間にアルケノン水温は13°Cから23°Cの範囲で変化した (図4; Yamamoto *et al.*, 2004; 2005)。アルケノン水温は微化石群集から求められた微化石温度指標 (黒潮種/黒潮種+親潮種の産出比) と良い相関を示した (石灰質ナノ化石は $r=0.57$, 浮遊性有孔虫は $r=0.77$, 珪藻は $r=0.53$; Oba and Kashima Core Research Group, 2002, 各微化石データは, Aizawa *et al.*, 2004; 新村ほか, 2006; Koizumi *et al.*, 2004より)。この高い相関は、アルケノン水温が主に黒潮・親潮境界の緯度的移動を反映していることを意味する。

酸素同位体ステージ1/2境界 (ターミネーションI; 約15,000年前) と5/6境界 (ターミネーションII; 約129,000年前) では、水温の上昇は酸素同位体比の変化に対してそれぞれ約千年と4千年遅れた (図4)。この水温変動の周期解析の結果、歳差運動に対応した明瞭な2.3万年と未知の3万年の周期性が認められた (図5A;

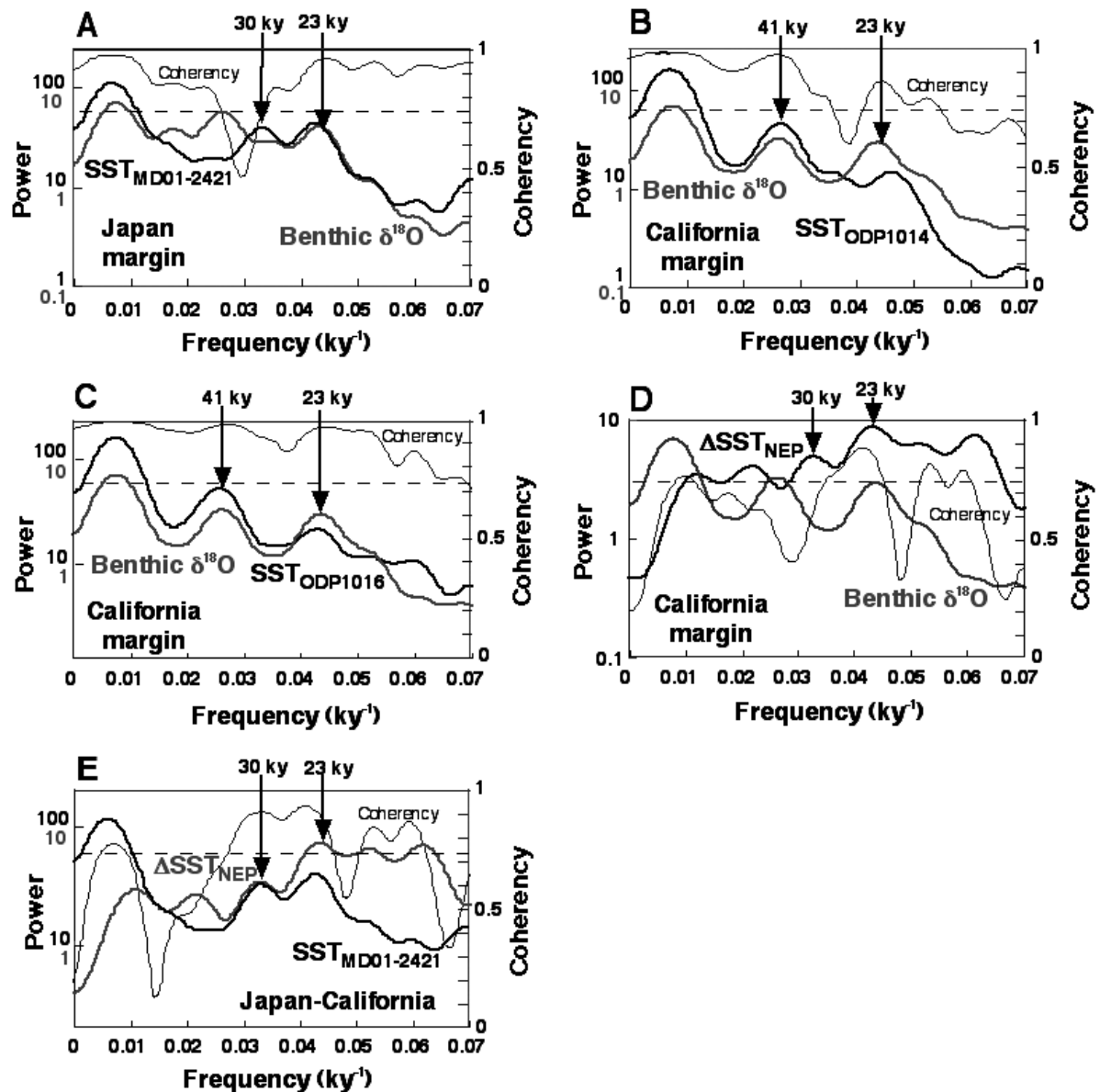


図5. (A) MD01-2421 コアのアルケノン水温と底生有孔虫 *Uvigerina* の $\delta^{18}\text{O}$ (5 ~ 142 ka, バンド幅 = 0.011); (B) 1014 地点のアルケノン水温と底生有孔虫 *Uvigerina* の $\delta^{18}\text{O}$ (3 ~ 136 ka, バンド幅 = 0.011); (C) 1016 地点のアルケノン水温と底生有孔虫 *Uvigerina* の $\delta^{18}\text{O}$ (3 ~ 136 ka, バンド幅 = 0.011); (D) $\Delta\text{SST}_{\text{NEP}}$ と 1014 地点の底生有孔虫 *Uvigerina* の $\delta^{18}\text{O}$ (3 ~ 136 ka, バンド幅 = 0.011); (E) $\Delta\text{SST}_{\text{NEP}}$ と MD01-2421 コアのアルケノン水温 (5 ~ 136 ka, バンド幅 = 0.011) のスペクトル密度とコヒーレンシー (Yamamoto, 2009). コヒーレンシーが破線値よりも高いとき、変動は互いに 80% 有意でコヒーレントである。スペクトル解析には Analyseries (Paillard *et al.*, 1996) を用いた。

Fig.5. Spectral densities and coherencies of (A) SST versus the $\delta^{18}\text{O}$ of the benthic foraminiferan *Uvigerina* for Core MD01-2421 from the Japan margin (5–142 ka, bandwidth = 0.011); (B) SST versus the $\delta^{18}\text{O}$ of *Uvigerina* for Site 1014 from the California margin (3–136 ka, bandwidth = 0.011); (C) SST of Site 1016 versus the $\delta^{18}\text{O}$ of *Uvigerina* for Site 1016 from the California margin (3–136 ka, bandwidth = 0.011); (D) $\Delta\text{SST}_{\text{NEP}}$ versus the $\delta^{18}\text{O}$ of *Uvigerina* for Site 1014 from the California margin (3–136 ka, bandwidth = 0.011) and (E) $\Delta\text{SST}_{\text{NEP}}$ versus the SST from Core MD01-2421 (5–136 ka, bandwidth = 0.011). The horizontal dashed line indicates an 80% level of nonzero coherency. After Yamamoto (2009). Spectral analysis was performed using Analyseries (Paillard *et al.*, 1996).

Yamamoto *et al.*, 2004; 2007b).

十勝沖 GH01-1030 コア

2002 年、産業技術総合研究所十勝沖航海 (GH02 航海) において第二白嶺丸を用いて、北海道十勝川河口沖南東約 70km の地点 (北緯 $42^{\circ}14'$, 東経 $144^{\circ}13'$) でピストン

コア GH02-1030 が採取された (図 1B)。このコアの年代モデルは、浮遊性有孔虫の放射炭素年代により確立された (Ikehara *et al.*, 2006)。このコアの採取地点は、親潮前線の近くに位置する (図 1B)。この海域は、冬から春は親潮水に覆われているが、夏から秋には黒潮続流から分離した暖水塊が到達する。

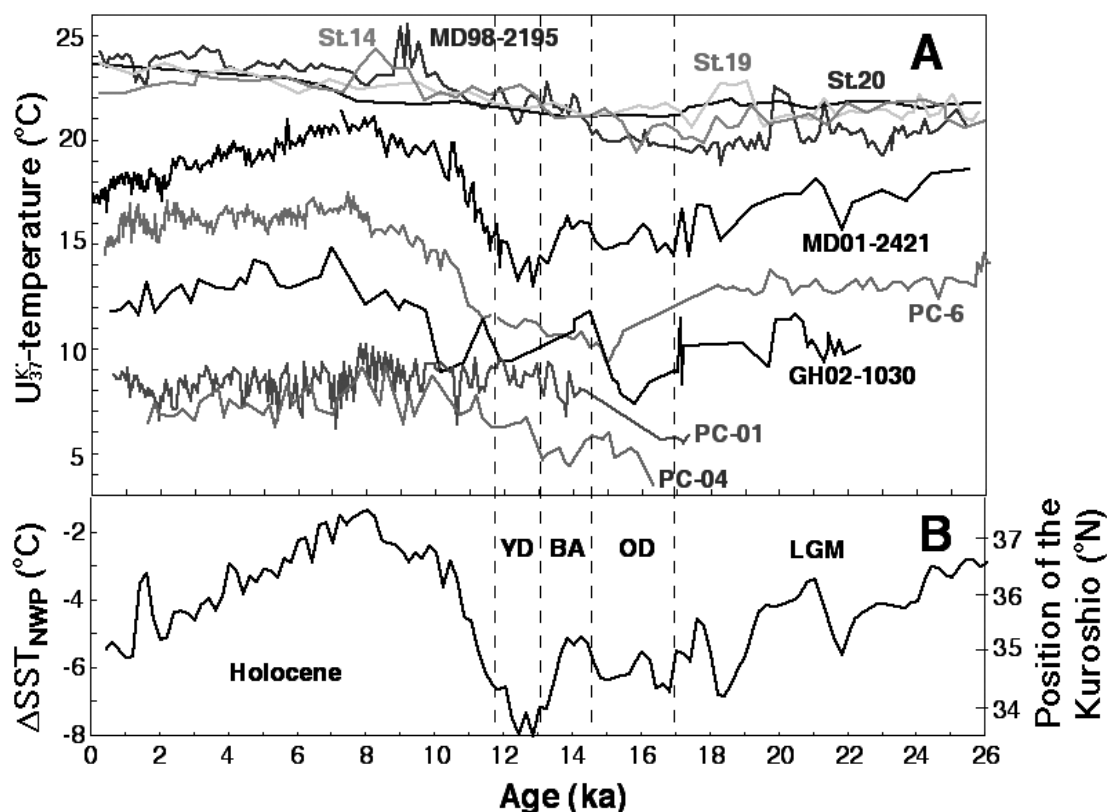


Fig. 6. 過去 2.6 万年間の北西太平洋各地点におけるアルケノン水温の変化. (A) MD01-2421 地点 (Yamamoto *et al.*, 2005; Isono *et al.*, 2009), PC-6 地点 (Minoshima *et al.*, 2006), GH02-1030 地点 (Inagaki *et al.*, 2009), 親潮域 (PC-01, PC-04; Harada *et al.*, 2004), 伊豆西七島海嶺 (St. 14, St. 19, St. 20; Sawada and Handa, 1998), 沖縄トラフ北部 (MD98-2195; Ijiri *et al.*, 2005) と (B) MD01-2421 地点と St 19 および St 20 コアの水温差 ($\Delta SST_{NWP} = SST_{St19 \& St20} - SST_{MD01-2421}$). U_K^{37} 値から水温への換算は, 培養実験にもとづき得られた水温換算式を用いて行われた (Prah *et al.*, 1988). YD = ヤンガードリアス期, BA = ベーリングアレレード期, OD = オールデストリアス期, LGM = 最終氷期最盛期. 図は Yamamoto (2009) より.

Fig. 6. (A) U_K^{37} -derived temperature records from Site MD01-2421 (Yamamoto *et al.*, 2005; Isono *et al.*, 2009), PC-6 (Minoshima *et al.*, 2006) and GH02-1030 (Inagaki *et al.*, 2009) during the last 26 kyr and those from the subarctic region (PC-01, PC-04; Harada *et al.*, 2004), Izu Ridge (St. 14, St. 19, St. 20; Sawada and Handa, 1998), and the northern Okinawa Trough (MD98-2195; Ijiri *et al.*, 2005), and (B) temperature difference between Site MD01-2421 and Cores St 19 and St 20 ($\Delta SST_{NWP} = SST_{St19 \& St20} - SST_{MD01-2421}$). The temperatures were calculated using an equation obtained by culture-based calibration (Prah *et al.*, 1988). YD = Younger Dryas period, BA = Bolling-Allerød period, OD = Oldest Dryas period, LGM = the last glacial maximum. After Yamamoto (2009).

過去 2.4 万年間の十勝沖の水温は, 鹿島沖の水温と似た変動を示した (図 6A; Inagaki *et al.*, 2009). 水温は最終氷期最盛期 (LGM) で現在よりも約 1°C 低く, オールデストリアス期 (Oldest Dryas period; 約 16,000 年前) にむけて低下, ベーリング・アレレード期 (Bolling-Allerød period; 約 14,000 年前) で上昇, ヤンガードリアス期 (Younger Dryas Period; 約 12,500 年前) で再び低下し, 完新世初頭で上昇した. その後, 約 1 万年前に再度ヤンガードリアス期に匹敵する水温低下があり, その後, 上昇し, 約 6 千年前に極大となり, 以降現在に向かい緩やかに低下した.

他の日本近海コアとの比較

上記の鹿島沖と十勝沖の水温変動に, 文献データを加えて, 変動パターンを比較した (図 6A). 黒潮・親潮境界 (鹿島沖 MD01-2421, 三陸沖 PC-6; Minoshima *et al.*,

2007; 十勝沖 GH02-1030) で認められる大きな水温変動 (鹿島沖で 8.5°C, 三陸沖で 8.1°C, 十勝沖 7.4°C) は, 黒潮軸流域やその南方の亜熱帯域では認められない (図 6A の St.14 コアで 3.2°C, St.19 コアで 2.2°C, St.20 コアで 0.9°C; Sawada and Handa, 1998). 同様に亜寒帯に属する千島列島ブッソル海峡沖 (図 6 の PC01 コアで 4.7°C, PC04 コアで 5.7°C; Harada *et al.*, 2004) でも黒潮・親潮境界ほどの大きな水温変動はみられない. 黒潮・親潮境界にみられるパラレルな水温変動は黒潮・親潮境界の南北移動を反映していると解釈される (Yamamoto *et al.*, 2005). Yamamoto (2009) では, 鹿島沖 (MD01-2421) と伊豆七島沖 (St. 19, 20; Sawada and Handa, 1998) の古水温差 ($\Delta SST_{northwestern \text{ Pacific (NWP)}} = SST_{MD01-2421} - SST_{St.19 \& St.20}$) から, 水温の緯度勾配が現在と同じに緯度 1 度あたり 1.64°C であると仮定し, 過去 2.6 万年間の本州東岸における夏季黒潮本流の位置の変動を復元した (図 6B). その結果, 黒

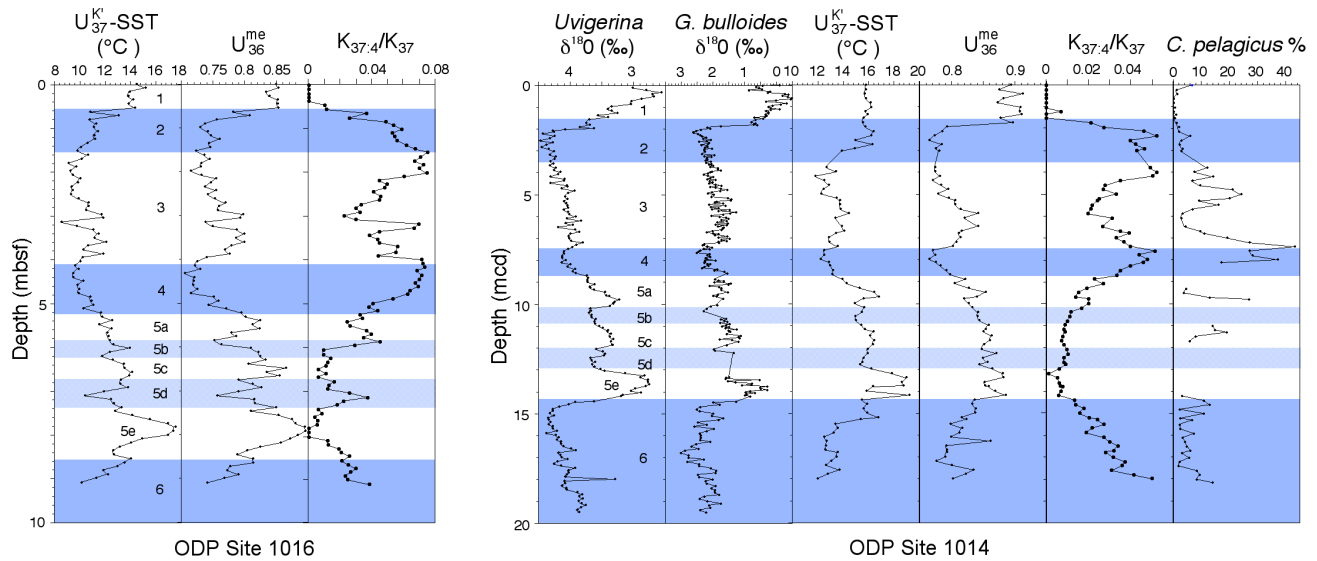


図7. 1014 地点と 1016 地点における U_{37}^K 由来水温, U_{36}^{me} 値, $K_{37.4}/K_{37}$ 比, *Coccolithus pelagicus* の石灰質ナノ化石中の割合 (Yamamoto *et al.*, 2007b, データの一部は Yamamoto *et al.*, 2000; 2004 より). 1014 地点の底生有孔虫 *Uvigerina* と浮遊性有孔虫 *Globigerina bulloides* の $\delta^{18}O$ 値 (Hendy and Kennett, 2000) を比較のため示した.

Fig. 7. The U_{37}^K -derived SST, U_{36}^{me} , and $K_{37.4}/K_{37}$ indices for Sites 1014 and 1016 and the abundance of *Coccolithus pelagicus* in relation to total coccoliths at Site 1014 (Yamamoto *et al.*, 2007b). The $\delta^{18}O$ profiles of *Uvigerina* and *Globigerina bulloides* at Site 1014 (Hendy and Kennett, 2000) are shown for comparison. Data for SST, U_{36}^{me} , and $K_{37.4}/K_{37}$ indices at Site 1016, and SST at Site 1014 are from Yamamoto *et al.* (2000, 2004).

潮主流は現在北緯 35.0° の位置にあるが, 1.28 万年前に最も南下し, 北緯 33.4° にあり, 8 千年に最も北上し, 北緯 37.5° の位置にあったと推測された (図 6B; Yamamoto, 2009).

Sawada and Handa (1998) は, 伊豆西七島海嶺南北トランセクトの 3 地点 (St. 14, St. 19, St. 20) でアルケノン古水温変動を調べ, 7 千年前では, 北側の地点が高水温であり, 1.5 万年前頃には南側の地点が高水温であったことを示した. 彼らは, 前者では黒潮の直進頻度が高く, 後者では蛇行頻度が高かったと解釈した. この七島・硫黄島海嶺の西側での水温変動と, 東側の鹿島沖の水温変動は, 呼応しており, 1.5 万年前の鹿島沖の水温が低いとき (黒潮統流が南下していたとき), 七島・硫黄島海嶺の西側では, 南側の水温が高く (蛇行頻度が高く), 7 千年前頃の鹿島沖の水温が高いとき (黒潮統流が北上していたとき), 伊豆七島海嶺の西側では, 北側の水温が高かった (直進頻度が高かった). このことから, 氷期間氷期スケールで, 黒潮の蛇行頻度が北太平洋表層循環の変動を反映していることが示唆される. 黒潮蛇行頻度の変動は, 今後の北西太平洋古海洋研究の興味深い研究対象となりうる.

北東太平洋カリフォルニア沖

カリフォルニア海流系は, 北から南へ流れるカリフォルニア海流 (California current), 北緯 30 度付近で反転し, 北上する南カリフォルニア反流 (Southern California countercurrent), 秋～冬にかけて出現する北向きのデイ

ビッドソン海流 (Davidson current), 水深数 100m を北に流れるカリフォルニア潜流 (California undercurrent) からなる (図 1C; Hickey, 1979). 北太平洋高気圧が発達する夏季は, カリフォルニア海流が強まり, 沿岸湧昇が活発化する. 他方, 北太平洋高気圧が弱まる冬季には, カリフォルニア海流が弱まり, 北向きの南カリフォルニア反流が強くなる (Hickey, 1979). これに類似した関係は 10 年スケール変動でもみられる. 1976～1977 年のレジームシフトを境にアリューシャン低気圧が強化し, PDO が負から正の位相に転換したが, これに対応して, カリフォルニア海流軸流が沖合にシフトし, 沿岸湧昇が弱体化, 北向きの南カリフォルニア反流とカリフォルニア潜流が強化し, カリフォルニアボーダーランド (北緯 34.5° 以南の沿岸域) が成層化し, 海面水温が高くなった (Bograd and Lynn, 2003).

カリフォルニア縁辺海古環境変動については, これまで多くの研究が行われてきた. その多くは, 過去 3 万年間を対象にしたものであるが, 1992 年の国際深海掘削計画 (ODP) 893 地点 (サンタバーバラ海盆) では, 過去 16 万年間に遡り, 古環境変動が平均 60 年の試料間隔で調べられた (Kennett *et al.*, 1995). 1996 年の ODP 第 167 節航海ではカリフォルニア縁辺海全域で 13 箇所の掘削が行われ, 中新世以降の堆積物コア試料が採取された (Lyle *et al.*, 1997).

カリフォルニア縁辺海古水温変動については, アルケノン, 有孔虫, 放散虫, 花粉を用いて多くの研究が行われている. 北カリフォルニア及びオレゴン縁辺海では, ア

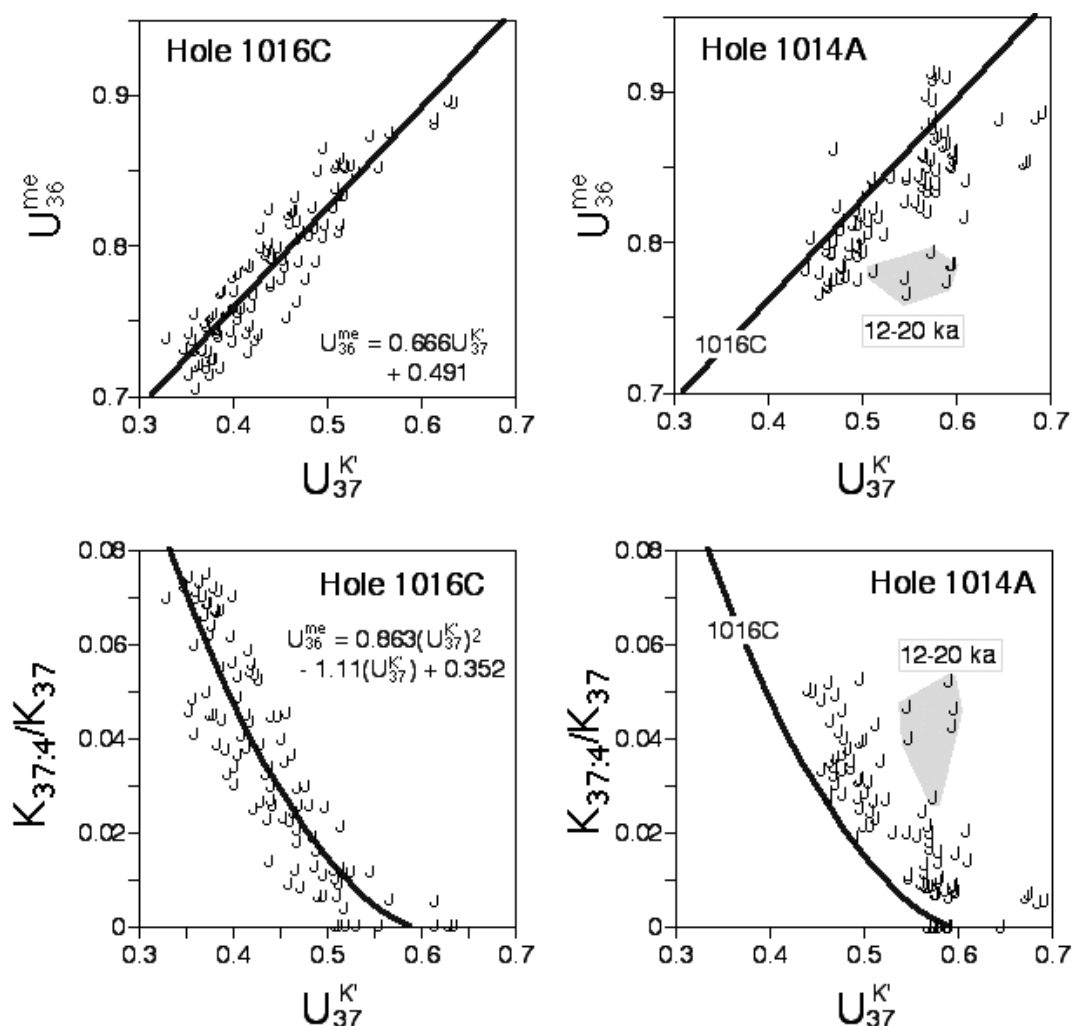


図 8. 1014 地点と 1016 地点の $U_{37}^{K'}-U_{36}^{me}$ 図と $U_{37}^{K'}-K_{37.4}/K_{37}$ 図 (Yamamoto *et al.*, 2007b).

Fig. 8. Plots of $U_{37}^{K'}-U_{36}^{me}$ and $U_{37}^{K'}-K_{37.4}/K_{37}$ for Sites 1014 and 1016 samples (Yamamoto *et al.*, 2007b).

ルケノン不飽和指標 (Prah *et al.*, 1995; Doose *et al.*, 1997; Mangelsdorf *et al.*, 2000; Seki *et al.*, 2002) と放散虫の群集組成 (Sabin and Pisias, 1996) や有孔虫の酸素同位体組成と群集組成 (Modern Analog 法) (Ortiz *et al.*, 1997) による見積もり結果はよく一致し、最終氷期最盛期では現在よりも 4°C 前後水温が低かったことが示されている。カリフォルニアボーダーランドでは、アルケノン不飽和指標による見積もりでは最終氷期最盛期と完新世の水温の差が $0 \sim 1^{\circ}\text{C}$ に対して (Herbert *et al.*, 1995; Doose *et al.*, 1997; Hinrichs *et al.*, 1997), 有孔虫の *N. pachyderma* の巻き方向と酸素同位体組成 (Kahn *et al.*, 1981; Kennett and Ingram, 1995; Kennett and Venz, 1995; Thunell and Mortyn, 1995; Mortyn *et al.*, 1996) と花粉 (Heusser, 1995) の見積もりでは、 5°C 以上である。このようにカリフォルニアボーダーランドでは、アルケノンと有孔虫・花粉による推定水温の不一致が顕著であり、その原因は不明であった。

ターナー海盆 ODP 1014 地点

ODP 1014 地点 (北緯 $32^{\circ}50'$, 西経 $119^{\circ}59'$) は南カリフォルニア反流の影響を受ける (図 1C)。1014 地点の年代モデルは、有機物の放射炭素年代 (Yamamoto *et al.*, 2007b) と酸素同位体層序 (Hendy and Kennett, 2000) にもとづき確立された。

このサイトの水温は、約 12°C から約 19°C の範囲で変動した。その水温変動は、2.3 万年 (歳差運動), 4.1 万年 (黄道傾斜変動), 10 万年 (離心率変動) の周期性を示す (図 5B)。ターミネーション I と II において、底生有孔虫酸素同位体比の低下に対して、水温の上昇が、それぞれ 8 千年と 6 千年早く起きた (図 7)。

コンセプション岬沖 ODP 1016 地点

ODP 1016 地点 (北緯 $34^{\circ}32'$, 西経 $122^{\circ}17'$) はカリフォルニア海流本流の影響を受ける (図 1C)。1016 地点の年代モデルは、有機物の放射炭素年代と窒素同位体比による 1014 地点との対比により確立された (Yamamoto *et al.*, 2007b)。

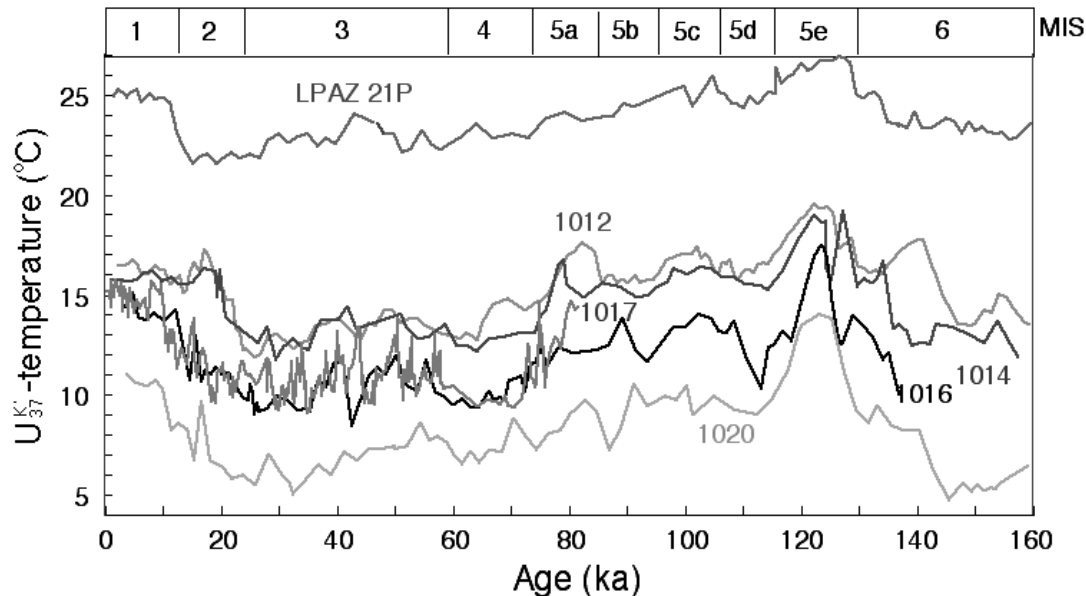


図9. 過去16万年間のカリフォルニア縁辺海のアルケノン水温変化, ODP 1020 地点 (Herbert *et al.*, 2001); 1016 地点 (Yamamoto *et al.*, 2000, 2007b); 1014 地点 (Yamamoto *et al.*, 2004); 1012 地点 (Herbert *et al.*, 2001); LPAZ21P コア (Herbert *et al.*, 2001). U_{37}^K 値から水温への換算は, 培養実験にもとづき得られたキャリブレーション式を用いて行われた (Prah *et al.*, 1988). 図は Yamamoto (2009) より.

Fig. 9. U_{37}^K -derived temperature records from ODP Site 1020 (Herbert *et al.*, 2001), Site 1016 (Yamamoto *et al.*, 2000, 2007b), Site 1014 (Yamamoto *et al.*, 2004), Site 1012 (Herbert *et al.*, 2001) and Core LPAZ21P (Herbert *et al.*, 2001) during the last 160 kyr. The U_{37}^K -derived temperatures were calculated using an equation obtained by culture-based calibration (Prah *et al.*, 1988). After Yamamoto (2009).

このサイトの水温は, 約9°Cから約18°Cの範囲で変動した. その水温変動は, 2.3万年(歳差運動), 4.1万年(黄道傾斜変動), 10万年(離心率変動)の周期性を示す(図5C). ターミネーションIとIIにおいて, 底生有孔虫酸素同位体比の低下に対して, 水温の上昇が, それぞれ8千年と6千年早く, 起きたが, その温度上昇は1014地点ほど顕著ではない(図7).

水温不一致問題

ターナー海盆では, 1014地点のステージ2後半(12,000年前~20,000年前)のアルケノン水温が, AHF10164や1014地点の浮遊性有孔虫の酸素同位体組成の示す水温(Kahn *et al.*, 1981; Hendy and Kennett, 2000)と比較して4°C以上高い. 興味深いことに, ステージ2前後の C_{36} メチルアルケノエイト(ハプト藻が生産するアルケノンと似た構造を持つ化合物)の不飽和指標値 U_{36}^{me} と四不飽和化合物の割合 $K_{37:4}/K_{37}$ ($[C_{37:4}Me]/\{[C_{37:4}Me]+[C_{37:3}Me]+[C_{37:2}Me]\}$)の変動パターンは, U_{37}^K 変動とは異なり, 浮遊性有孔虫*Globigerina bulloides*の酸素同位体変動(Hendy and Kennett, 2000)と似ている(図7). U_{37}^K は U_{36}^{me} および $K_{37:4}/K_{37}$ と全体として良い相関を示すものの, ステージ2後半(2万年前~1.2万年前)の試料は, 他の試料に比べて高値を示す(図8). 他方, 1016地点では, U_{36}^{me} と $K_{37:4}/K_{37}$ の変動は, U_{37}^K 変動と似ており(図7). U_{37}^K は U_{36}^{me} および $K_{37:4}/K_{37}$ と良い相関を示す(図8). このことは, 1014地点では, アルケノンの供給源がすくなく

とも二つあることを示唆する. 想定される第一の供給源は, C_{36} メチルアルケノエイトと $C_{37:4}$ アルケノンに富む, 冷水中で生育するハプト藻種であり, 第二の供給源は, C_{36} メチルアルケノエイトと $C_{37:4}$ アルケノンに乏しい, 暖水中で生育するハプト種である. サンタバーバラ海盆でのセジメントトラップ実験では, エルニーニョ状態で春季の湧昇が非活発であるとき, ハプト藻の移出生産が高く(円石のフラックスとして測定される), 特に熱帯種である*Gephyrocapsa oceanica*が増加し(De Bernardi *et al.*, 2005), 浮遊性有孔虫*Globigerina bulloides*と*Neoglobobulimina pachyderma* (dextral)の移出生産が減少する(Pak *et al.*, 2004). もし, ステージ2後半のカリフォルニアボーダーランドが, 亜熱帯水が頻繁に進入してくるような現在のエルニーニョ状態と似た状況(Bograd and Lynn, 2001)であったと仮定すると, 第二タイプの生産が高まり, 浮遊性有孔虫と第一タイプの生産が低下するであろう. この生態学的条件が成立すると, U_{37}^K は有孔虫や U_{36}^{me} よりも高い水温を記録することになる. ステージ2後半における高い U_{37}^K 値は, カリフォルニアボーダーランドへの暖水の進入を反映していると考えられる.

ODP 1014 地点と 1016 地点の水温の比較

1014地点と1016地点の水温変動は, 強い10万年(離心率変動), 4.1万年(黄道傾斜変動), 2.3万年(歳差運動)の周期性を示し, 各周期の変動は, 底生有孔虫*Uvigerina*の酸素同位体組成変動とコヒーレントであった(図5B, 5C).

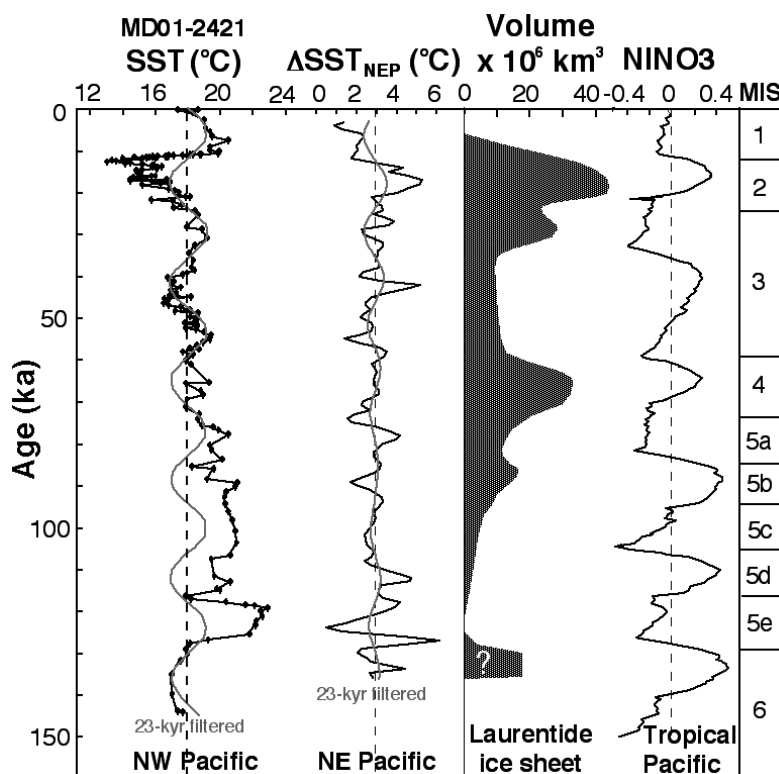


図 10. 過去 15 万年間の日本沖アルケノン水温 (core MD01-2421) とカリフォルニア縁辺海 ΔS_{NEP} ($S_{ODP1014} - S_{ODP1016}$) の変動 (Yamamoto *et al.*, 2007b を一部改変). モデルによる NINO3 指標値 (Clement *et al.*, 1999) とローレンタイド氷床の体積の変動 (Boulton *et al.*, 1985) を比較のため示した. 2.3 万年バンドパスフィルター化は, Analyseries (Paillard *et al.*, 1996) を用いて行われた.

Fig. 10. The U_{37}^{K} -derived SST at the Japan margin (core MD01-2421; Yamamoto *et al.*, 2005), and U_{37}^{K} -derived sea surface temperatures (SSTs) of ODP Sites 1014 and 1016 and the ΔS_{NEP} ($S_{ODP1014} - S_{ODP1016}$) at the California margin during the last 150 kyr. The calculated NINO3 index (Clement *et al.*, 1999) and the estimated volume of the Laurentide ice sheet (Boulton *et al.*, 1985) are shown for comparison. Modified from Yamamoto *et al.* (2007b). Gaussian band pass filtering centered at 23 ky was performed using the Analyseries software package (Paillard *et al.*, 1996).

カリフォルニア縁辺海は、氷期にはローレンタイド氷床の近くに位置しており、モデル実験研究ではローレンタイド氷床上に高気圧が半永続的に発達していた可能性が指摘されている (Kutzbach and Wright, 1985). この高気圧から吹き出た冷風がカリフォルニア海岸の海面を冷却することにより、カリフォルニア沖水温が氷床体積変動にตอบสนองした可能性が考えられる (Yamamoto, 2009).

カリフォルニア沖の各地点の水温記録は、類似の氷期・間氷期変動を示すが、融氷期の早期温暖化はカリフォルニアボーダーランド (1014 地点と 1012 地点) でのみ顕著に認められる (図 9). 1976 ~ 1977 年のレジームシフト後のカリフォルニア海流の弱化と北向きの海流の強化に伴い、ODP 1014 地点と 1016 地点の海面温度は上昇したが、その上昇はカリフォルニアボーダーランドに位置する 1014 地点でより大きかった (Bograd and Lynn, 2003). このことから、カリフォルニア海流の弱化は上記二地点の水温差を大きくすると考えられる. この 2 地点の水温差 $S_{ODP1014} - S_{ODP1016}$ を ΔS_{NEP} (northeastern Pacific (NEP)) とすると、カリフォルニア沖における ΔS_{NEP} は 0.4°C から 6.1°C の範囲で変動した (図 10; Yamamoto *et al.*,

2007b). ステージ 2 後半 (約 18,000 年前) とステージ 5e 前半 (約 128,000 年前) で ΔS_{NEP} は高く、カリフォルニア海流が弱かったことが示された. また、ステージ 5 中期 (約 124,000 年前) とステージ 1 (12,000 年前以降) では、 ΔS_{NEP} は低く、カリフォルニア海流が強かったことが示された. サイト 1014 と 1016 の水温の変動パターンを周期解析したところ、 ΔS_{NEP} は 2.3 万年周期 (歳差運動) と 3 万年周期が卓越した (図 5D; Yamamoto *et al.*, 2007b).

鹿島沖とカリフォルニア沖の水温変動の対比

過去 13.6 万年間の鹿島沖古水温変動とカリフォルニア沖 ΔS_{NEP} 変動を比較すると、逆位相の関係にあることが明らかになった (図 10; Yamamoto *et al.*, 2007b). 両地点ともに 2.3 万年と 3 万年の周期性を示し、4.1 万年周期は欠如する (図 5E). クロススペクトル解析を行うと、両変動は 2.3 万年と 3 万年に関してコヒーレントであり、 ΔS_{NEP} が鹿島沖古水温に対して、2.3 万年周期では $169 \pm 12^{\circ}$ ($10,800 \pm 800$ 年), 3 万年周期では $127 \pm 11^{\circ}$

(8100 ± 700 年) 先行していることが示された。2.3 万年周期に関して、カリフォルニア沖で $\Delta\text{SST}_{\text{NEP}}$ が高いとき、鹿島沖水温は低く、その逆もまた真である (図 10)。

黒潮統流域の海面高度の変動記録から、黒潮統流は流量が大きく、軸流位置が北ヘシフトする伸張モードと、流量が小さく、軸流が南ヘシフトする収縮モードを数年スケールで繰り返していることが示された (Qiu *et al.*, 2002)。もし、このような関係が長時間スケールにおいても成り立つならば、鹿島沖水温の低下 (黒潮統流の南下) は統流の流量の低下を、水温の上昇 (統流の北上) は流量の増加に対応し、統流の強度が歳差運動に応答していることを意味する。すなわち、カリフォルニア沖で $\Delta\text{SST}_{\text{NEP}}$ が高く、鹿島沖水温が低いことは、カリフォルニア海流と黒潮統流の両者がともに弱かったことを示唆している。カリフォルニア海流と黒潮統流は北太平洋亜熱帯循環を構成する要素であるので、カリフォルニア沖 $\Delta\text{SST}_{\text{NEP}}$ と鹿島沖水温の逆位相的変動は、北太平洋亜熱帯循環が歳差運動強制力に応答して変動していることに起因すると考えられる (Yamamoto, 2009)。

これまで、北西太平洋では、黒潮・親潮境界は氷期に南下し、間氷期に北上すると考えられていた (Thompson and Shackleton, 1980; Moore *et al.*, 1980; Thompson, 1981 など)。また、北東太平洋では、カリフォルニア海流強度はローレンタイド氷床の発達と関係があると考えられていた (Kutzbach and Wright, 1985; Lyle *et al.*, 1992; Doose *et al.*, 1997; Mangelsdorf *et al.*, 2000; Herbert *et al.*, 2001)。しかし、上述のように、北太平洋中緯度縁辺域の水温変動は北太平洋の亜熱帯循環の変動を反映していると考えられると、理解が容易である (Yamamoto, 2009)。

熱帯太平洋とのリンク

数万年の時間スケールにおいて熱帯太平洋 ENSO がどのように挙動したかについて定説はない。Clement *et al.* (1999) は、Zebiak-Cane ENSO モデルに基づく大気海洋物理モデルを用いて、歳差運動に依存する日射季節性変動が ENSO の挙動を変化させた可能性があることを示した (図 10 の calculated NINO3)。

歳差運動周期の 2.3 万年周期変動において、北太平洋亜熱帯循環強度の極小は 4 月の近日点と一致し、Zebiak-Cane ENSO モデルにより予測された NINO3 指標 (Clement *et al.*, 1999) の極大と同調している。このことは、熱帯太平洋の大気海洋相互作用の長期的変動が北太平洋高気圧およびアリューシャン低気圧の変動や偏西風軸流位置や強度の変動を介して、北太平洋中緯度域の気候に影響を及ぼしてきたことを示唆している (Yamamoto *et al.*, 2004, 2007b, Yamamoto, 2009)。

まとめ

アルケノン不飽和指標を用いた古水温復元手法はすでに成熟した段階にあり、第四紀海洋環境を復元するうえで、不可欠なツールになった。アルケノン古水温推定法の利点は、高精度であること、適用海域が広いこと、分析が比較的容易であることである。他方、第三紀以前の堆積物への適用の有用性が未知であることなど、問題点・限界点もある。詳しくは山本 (1999) のレビューを参照されたい。

過去の気候変動のメカニズムを理解する上で、変動の空間的同時性に注目することが有益である。異なる地点で同調して起きた変動を発見することにより、その地点を結ぶ気候プロセスを考察することができる。この観点から、地球上で起きた変動を整理してゆくことが、全球気候変動を理解することに役立つと著者は考えている。このような作業を行う上で、多くの試料を分析し、時間解像度の高い水温記録を他地点で得てゆくことが重要であり、この点において、アルケノン古水温推定法の適用はますます活発化すると予想される。

本論文では、北太平洋域での研究成果として、北西太平洋と北東太平洋の中緯度域の夏季水温は、2.3 万年周期で変動しており、北太平洋亜熱帯循環強度の歳差運動への応答を反映していることを解説した。北太平洋以外の大洋の亜熱帯循環はどのように変動したのか、また亜寒帯循環はどうなのか、についてはまだ十分に整理されておらず、既存データのコンパイルや新規データの取得が必要である。

謝辞

シンポジウム世話人の尾田太良博士には、本特集号に執筆の機会をいただいた。小泉 格博士、多田隆治博士には、ODP Leg 167 に参加する機会をいただいた。川幡穂高博士、大場忠道博士には、IMAGES 西太平洋航海に参加する機会をいただいた。鹿島コア研究グループ (代表：大場忠道) 諸博士、本論文に紹介した論文を共同執筆した学生諸氏、入野智久博士、五十嵐八枝子博士、田中裕一郎博士、山室真澄博士、見延庄士郎博士には、データの解釈において有益な議論をいただいた。萩野恭子博士には、ハプト藻の電顕写真を提供いただいた。鈴木紀毅博士、沢田 健博士、西 弘嗣博士には、原稿を改善する上で有益なコメントをいただいた。この場をお借りして感謝の意を表する。

文献

- Aizawa, C., Oba, T. and Okada, H., 2004. Late Quaternary paleoceanography deduced from coccolith assemblages in a piston core recovered off the central Japan coast. *Marine Micropaleontology*, **52**, 277-297.
- Bograd, S. and Lynn, R. J., 2001. Physical-biological coupling in the California Current during the 1997-99 El Niño-La Niña cycle. *Geophysical Research Letters*, **28**, 275-278.

- Bograd, S. J. and Lynn, R. J., 2003. Long-term variability in the Southern California Current System. *Deep-Sea Research II*, **50**, 2355-2370.
- Boulton, G. S., Smith, G. D., Jones, A. S. and Newsome, J., 1985. Glacial geology and glaciology of the last mid-latitude ice sheets. *Journal of Geological Society (London)*, **142**, 447-474.
- Brassell, S. C., Eglinton, G., Marlowe, I. T., Pflaumann, U. and Sarnthein, M., 1986. Molecular stratigraphy: a new tool for climatic assessment. *Nature*, **320**, 129-133.
- Chinzei, K., Fujioka, K., Kitazato, H., Koizumi, I., Oba, T., Oda, M., Okada, H., Sakai, T. and Tanimura, Y., 1987. Postglacial environmental change of the Pacific Ocean off the coasts of central Japan. *Marine Micropaleontology*, **11**, 273-291.
- Clement, A. C., Seager, R. and Cane, M. A., 1999. Orbital controls on the El Niño/Southern Oscillation and the tropical climate. *Paleoceanography*, **14**, 441-456.
- Conkright, M. E. et al. 2002. *World Ocean Atlas 2001: Objective Analyses, Data Statistics, and Figures, CD-ROM Documentation*. 17pp. National Oceanographic Data Center, Silver Spring, MD.
- De Bernardi, B., Ziveri, P., Erba, E. and Thunell, R. C., 2005. Coccolithophore export production during the 1997-1998 El Niño event in Santa Barbara basin (California). *Marine Micropaleontology*, **55**, 107-125.
- Dettinger, M. D., Battisti, D. S., Garreaud, R. D., McCabe, Jr., G. J. and Bitz, C.M., 2001. Interhemispheric effects of interannual and decadal ENSO-like climate variations on the Americas. In Markgraf, V., ed., *Interhemispheric Climate Linkages*, 1-16. Academic Press, San Diego.
- Di Lorenzo, E., Schneider, N., Cobb, K. M., Franks, P. J. S., Chhak, K., Miller, A. J., McWilliams, J. C., Bograd, S. J., Arango, H., Curchitser, E., Powell, T. M. and Rivière, P., 2008. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change. *Geophysical Research Letters*, **35**, L08607.
- Doose, H., Prahl, F. G. and Lyle, M. W., 1997. Biomarker temperature estimates for modern and last glacial surface waters of the California Current system between 33° and 42° N. *Paleoceanography*, **12**, 615-622.
- Harada, N., Ahagon, N., Uchida, M. and Murayama, M., 2004. Northward and southward migrations of frontal zones during the past 40 kyr in the Kuroshio-Oyashio transition area. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **5**, Q09004.
- Harada, N., Sato, M., Shiraishi, A. and Honda, M.C., 2006. Characteristics of alkenone distributions in suspended and sinking particles in the northwestern North Pacific. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **70**, 2045-2062.
- Hendy, I. L. and Kennett, J. P., 2000. Stable isotope stratigraphy and paleoceanography of the last 170 ka: ODP Site 1014, Tanner Basin, California. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **167**, 129-140.
- Herbert, T. D., Yasuda, M. and Burnett, C., 1995. Glacial-interglacial sea-surface temperature record inferred from alkenone unsaturation indices, Site 898, Santa Barbara basin. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **146**, 257-263.
- Herbert, T. D., Schuffert, J. D., Andreasen, D., Heusser, L., Lyle, M., Mix, A., Ravelo, A. C., Stott, L. D. and Herguera, J. C., 2001. Collapse of the California Current during glacial maxima linked to climate change on land. *Science*, **293**, 71-76.
- Heusser, L. E., 1995. Pollen stratigraphy and paleoecologic interpretation of the 160-K.Y. record from Santa Barbara Basin, Hole 893A. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **146**, 265-279.
- Hickey, B. M., 1979. The California Current System-hypotheses and facts. *Progress in Oceanography*, **8**, 191-279.
- Hinrichs, K.-U., Rinna, J., Rullkötter, J. and Stein, R., 1997. A 160 kyr record of alkenone-derived sea-surface temperatures from Santa Barbara basin sediments. *Naturwissenschaften*, **84**, 126-128.
- Ijiri, A., Wang, L., Oba, T., Kawahata, H., Huang, C. Y. and Huang, C. Y., 2005. Paleoenvironmental changes in the northern area of the East China Sea during the past 42,000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **219**, 239-261.
- Ikehara, K., Ohkushi, K., Shibahara, A. and Hoshiba, M., 2006. Change of bottom water conditions at intermediate depths of the Oyashio region, NW Pacific over the past 20,000 yrs. *Global and Planetary Change*, **53**, 78-91.
- Inagaki, M., Yamamoto, M., Igarashi, Y. and Ikehara, K., 2009. Biomarker records from Core GH02-1030 off Tokachi in the northwestern Pacific over the last 23,000 years; Environmental changes during the last deglaciation. *Journal of Oceanography*, in press.
- Isono, D., Yamamoto, M., Irino, T., Oba, T., Murayama, M., Nakamura, T. and Kawahata, K., 2009. The 1,500-year climate oscillation in the mid-latitude North Pacific during the Holocene. *Geology*, **37**, 591-594.
- Kahn, M. I., Oba, T. and Ku, T. -L., 1981. Paleotemperatures and the glacially induced changes in the oxygen-isotope composition of sea water during late Pleistocene and Holocene time in Tanner Basin, California. *Geology*, **9**, 485-490.
- 海洋資料センター, 1975. 海洋環境図外洋編—北西太平洋—, 165p. 日本水路協会.
- Kennett, J. P., Baldauf, J. G. and Lyle, M., 1995. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results (Part 2) Site 893, Santa Barbara Basin*, 360p. College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Kennett, J. P. and Ingram, B. L., 1995. A 20,000-year record of ocean circulation and climate change from the Santa Barbara basin. *Nature*, **377**, 510-512.
- Kennett, J. P. and Venz, K., 1995. Late Quaternary climatically related planktonic foraminiferal assemblage changes: Hole 893A, Santa Barbara Basin, California. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **146**, 281-293.
- Koizumi, I., Irino, T. and Oba, T., 2004. Paleoceanography during the last 150 kyr off central Japan based on diatom floras. *Marine Micropaleontology*, **53**, 293-365.
- Kutzbach, J. E. and Wright, H. E., 1985. Simulation of the climate of 18,000 years B. P.: results for the North American/North Atlantic/European sector and comparison with the geological record of North America. *Quaternary Science Reviews*, **4**, 147-187.
- Lyle, M., Zahn, R., Prahl, F., Dymond, J., Collier, R., Pisias, N. and Suess, E., 1992. Paleoproductivity and carbon burial across the California Current: The Multitraces transect, 42°N. *Paleoceanography*, **7**, 251-272.
- Lyle, M., Koizumi, I., Richter, C. et al., 1997. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*, **167**, 495p. Ocean Drilling Program, College Station.
- Mangelsdorf, K., Güntner, U. and Rullkötter, J., 2000. Climatic and oceanographic variations on the California continental margin during the last 160 kyr. *Organic Geochemistry*, **31**, 829-846.
- Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M. and Francis, R. C., 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **78**, 1069-1079.
- Marlowe, I. T., Brassell, S. C., Eglinton, G. and Green, J. C., 1984. Long chain unsaturated ketones and esters in living algae and marine sediments. *Organic Geochemistry*, **6**, 135-141.
- Marlowe, I. T., Brassell, S. C., Eglinton, G. and Green, J. C., 1990. Long-chain alkenones and alkyl alkenoates and the fossil coccolith record of marine sediments. *Chemical Geology*, **88**, 349-375.
- Minobe, S., 1997. A 50-70 climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophysical Research Letters*, **24**, 683-686.
- Minoshima, K., Kawahata, H., Ikehara, K., 2007. Changes in biological production in the mixed water region (MWR)

- of the northwestern North Pacific during the last 27 kyr. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **254**, 430-447.
- Moore, T. C., Burkle, L. H., Geitzenauer, K., Luz, B., Molina-Cruz, A., Robertson, J. H., Sachs, H., Sancetta, C., Thiede, J., Thompson, P. and Wenkam, C., 1980. The reconstruction of sea surface temperatures in the Pacific Ocean of 18,000 B. P. *Marine Micropaleontology*, **5**, 215-247.
- Mortyn, P. G., Thunell, R. C., Anderson, D. M., Stott, L. D. and Le, J., 1996. Sea surface temperature changes in the Southern California Borderlands during the last glacial-interglacial cycles. *Paleoceanography*, **11**, 415-430.
- 新村 靖・入野智久・大場忠道, 2006. 浮遊性有孔虫群集から見た鹿島沖の過去 14.4 万年間の環境変動. 化石, **79**, 4-17.
- 大場忠道・安田尚登, 1992. 黒潮域における最終氷期以降の環境変動. 第四紀研究, **31**, 329-339.
- Oba, T. and Kashima Core Research Group, 2002. Multi-disciplinary analysis of IMAGES core (MD012421) in the northwest Pacific Ocean, paper presented at AGU 2002 Fall Meeting, San Francisco, 6-10 December.
- Oba, T., Irino, T., Yamamoto, M., Murayama, M., Takamura, A. and Aoki, K., 2006. Paleooceanographic change off central Japan since the last 144,000 years based on high-resolution oxygen and carbon isotope records. *Global and Planetary Change*, **53**, 5-20.
- 尾田太良・嶽本あゆみ, 1992. 浮遊性有孔虫からみた黒潮流域における過去 2 万年間の海洋変動. 第四紀研究, **31**, 341-357.
- Ortiz, J., Mix, A., Hostetler, S. and Kashgarian, M., 1997. The California Current of the last glacial maximum: Reconstruction at 42 °N based on multiple proxies. *Paleoceanography*, **12**, 191-205.
- Paillard, D., Labeyrie, L. and Yion, P., 1996. Macintosh program performs time-series analysis. *EOS Transactions, American Geophysical Union*, **77**, 379.
- Pak, D. K., Lea, D. W. and Kennett, J. P., 2004. Seasonal and interannual variation in Santa Barbara Basin water temperatures observed in sediment trap foraminiferal Mg/Ca. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, **5**, Q12008.
- Prahl, F. G. and Wakeham, S. G., 1987. Calibration of unsaturation patterns in long-chain ketone compositions for palaeotemperature assessment. *Nature*, **330**, 367-369.
- Prahl, F. G., Muehlhausen, L. A. and Zahnle, D. L., 1988. Further evaluation of long-chain alkenones as indicators of paleoceanographic conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **52**, 2303-2310.
- Prahl, F. G., Collier, R. B., Dymond, J., Lyle, M. and Sparrow, M. A., 1993. A biomarker perspective on prymnesiophyte productivity in the northeast Pacific Ocean. *Deep-Sea Research Part I*, **40**, 2061-2076.
- Prahl, F. G., Paisas, N., Sparrow, M. A. and Sabin, A., 1995. Assessment of sea-surface temperature at 42°N in the California Current over the last 30,000 years. *Paleoceanography*, **10**, 763-773.
- Qiu, B., 2002. The Kuroshio Extension system: its large-scale variability and role in the midlatitude ocean-atmosphere interaction. *Journal of Oceanography*, **58**, 57-75.
- Reynolds, R. W., Rayner, N. A., Smith, T. M., Stokes, D. C. and Wang, W., 2002. An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *Journal of Climate*, **15**, 1609-1625.
- Sabin, A. L. and Pisias, N. G., 1996. Sea surface temperature changes in the northwestern Pacific Ocean during the past 20,000 years and their relationship to climate change in northwestern North America. *Quaternary Research*, **46**, 48-61.
- Sawada, K. and Handa, N., 1998. Variability of the path of Kuroshio ocean current over the past 25,000 years. *Nature*, **392**, 592-595.
- Sawada, K., Handa, N. and Nakatsuka, T., 1998. Production and transport of long-chain alkenones and alkyl alkenoates in a sea water column in the northwestern Pacific off central Japan. *Marine Chemistry*, **59**, 219-234.
- Seki, O., Ishiwatari, R. and Matsumoto, K., 2002. Millennial climate oscillation in NE Pacific surface waters over the last 82 kyr: New evidence from alkenones. *Geophysical Research Letters*, **29**, 2144.
- Thompson, P. R. and Shackleton, N. J., 1980. North Pacific paleoceanography: late Quaternary coiling variations of planktonic foraminifer *Neogloboquadrina pachyderma*. *Nature*, **287**, 829-833.
- Thompson, P. R., 1981. Planktonic foraminifera in the western North Pacific during the past 150,000 years: Comparison of modern and fossil assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **35**, 241-279.
- Thunell, R. C. and Mortyn, P. G., 1995. Glacial climate instability in the Northwest Pacific Ocean. *Nature*, **376**, 504-506.
- Volkman, J. K., Eglinton, G., Corner, E. D. S. and Sargent, J. R., 1980. Novel unsaturated straight-chain C₃₇-C₃₉ methyl and ethyl ketones in marine sediments and a coccolithophore *Emiliania huxleyi*. In Douglas, A. G. and Maxwell, J. R. ed., *Advances in Organic Geochemistry 1979*, 219-227. Pergamon Press, Oxford.
- Volkman, J. K., Barrett, S. M., Blackburn, S. I. and Sikes, E. L., 1995. Alkenones in *Gephyrocapsa oceanica*: Implications for studies of paleoclimate. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **59**, 513-520.
- 山本正伸, 1999. アルケノン古水温計の現状と課題. 地球化学, **33**, 191-204.
- Yamamoto, M., Yamamuro, M. and Tada, R., 2000. Late Quaternary records of organic carbon, calcium carbonate and biomarkers from Site 1016 off Point Conception, California margin. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, **167**, 183-194.
- Yamamoto, M., Oba, T., Shimamune, J. and Ueshima, T., 2004. Orbital-scale anti-phase variation of sea surface temperature in mid-latitude North Pacific margins during the last 145,000 years. *Geophysical Research Letters*, **31**, L16311.
- Yamamoto, M., Suemune, R. and Oba, T., 2005. Equatorward shift of the subarctic boundary in the northwestern Pacific during the last deglaciation. *Geophysical Research Letters*, **32**, L05609.
- Yamamoto, M., Shimamoto, A., Fukuhara, T., Naraoka, H., Tanaka, Y. and Nishimura, A., 2007a. Seasonal and depth variations in molecular and isotopic alkenone composition of sinking particles from the western North Pacific. *Deep-Sea Research I*, **54**, 1571-1592.
- Yamamoto, M., Yamamuro, M. and Tanaka, Y., 2007b. The California current system during the last 136,000 years: response of the North Pacific High to precessional forcing. *Quaternary Science Reviews*, **26**, 405-414.
- 山本正伸, 2009. 北太平洋亜熱帯循環の氷期・間氷期変動. 地質学雑誌, **115**, 325-332.
- Yamamoto, M., 2009. Response of mid-latitude North Pacific surface temperatures to orbital forcing and linkage to the East Asian summer monsoon and tropical ocean-atmosphere interactions. *Journal of Quaternary Science*, in press.
- 山本正伸・五十嵐八枝子・大場忠道, 2009. 北太平洋亜熱帯循環の氷期・間氷期変動—熱帯大気海洋相互作用および東アジア夏季モンスーンとの関連. 第四紀研究, **48**, 195-206.