

有機化合物による古水温の復元

古宮 正利¹⁾・寺島 美南子¹⁾

1. はじめに

過去の気候, 特に気温や海水温とその変化を推定, 復元する研究は, 湖沼や海底の堆積物コアからの情報を読みとることによって, 数多く行われてきた。このような古気候復元の研究の中で, これまで広範に行われてきたものは, 有孔虫の石灰質殻の酸素同位体組成を用いた研究である。この方法によって第四紀の氷期/間氷期のサイクルが解明, 確立されたことはよく知られている。一方これ以外にも種々の方法で研究が行われている。たとえば, 気候の変動に伴い植生が変化することから, 湖底堆積物に残された過去の花粉や孢子の種類とその出現頻度を調べて, 古気候を推定する研究がされている。また海洋の生物の形態や存在量は, 水温などの様々な環境変化に対して敏感に反応して変化する。そこで海底堆積物コアから産出するある種の有孔虫の形(大きさ)の大小や, その殻の巻き方の方向, およびそれらの個体数(産出頻度)を調べることにより, その時代の水温が相対的に高かったのか, それとも低かったのかを知ることができる。さらにこうしたデータを統計的に処理することにより, 古水温の絶対値が推定されている。

最近, 堆積物に残された, 過去の生物が生産した有機化合物を調べて, 古気候を復元する研究が盛んに行われるようになってきた(この分野の研究については優れた総説が出されている(Brassell, 1993))。特に長鎖アルケノンという化合物のグループが, 古水温(古海面温度)の指標として注目されている。本稿では有機化合物を利用した古気候復元について, 長鎖アルケノンを用いた古水温の復元を中心に, その方法と実際の研究例を簡単に紹介する。

2. 有機化合物を用いた古気候復元の実際

2.1 不飽和脂肪酸による古気候推定

堆積物中の有機化合物を利用して古気候を推定する初期の研究は, 不飽和脂肪酸を調べることよって行われた(Kawamura and Ishiwatari, 1981)。彼らは琵琶湖の堆積物を採取し, 過去2万年に相当する20 mのコア試料を分析した。その結果, 炭素数が18で不飽和数(分子中の二重結合の数)が2の脂肪酸の量を, 炭素数が18で飽和の脂肪酸の量で割った比が, 温暖な時期には低く, 寒冷な時期には高い傾向を示すことがわかった。すなわち, 寒冷な時期の堆積物には不飽和脂肪酸が多く含まれていた。

不飽和脂肪酸は脂質の構成成分として, 生物の細胞膜に広く含まれている。そして生物の中には, 細胞膜の流動性(柔らかさ)を調節するため, 周囲の環境が低温になると不飽和脂肪酸の含有率が高くなるものがある。この結果は, こうした生物の性質を反映したものと考えられている(Kawamura and Ishiwatari, 1981)。古環境指標に用いる有機化合物としては, 安定性が高く, 埋没に至る前や埋没後に堆積物中での分解や変化を受けにくいものほど有用である。しかし不飽和脂肪酸は比較的变化しやすく堆積物中に残存する割合が低いので, 古気候復元の目的には, 適用範囲が限られる。

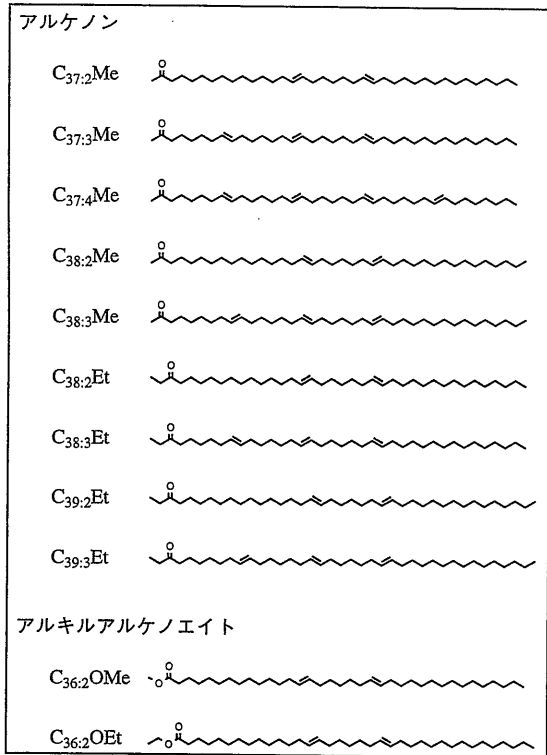
2.2 長鎖アルケノンによる古水温復元

—アルケノン古水温指標—

長鎖アルケノンは, 深海掘削計画(DSDP)によってアフリカ南西沖のウォルビス海嶺から採取された, 中新世から鮮新世に渡る堆積物中から最初に発見された(Boon et al., 1978)。その後の研究で, 長鎖アルケノンは第1図に示すような構造を持つ炭

1) 地質調査所 燃料資源部

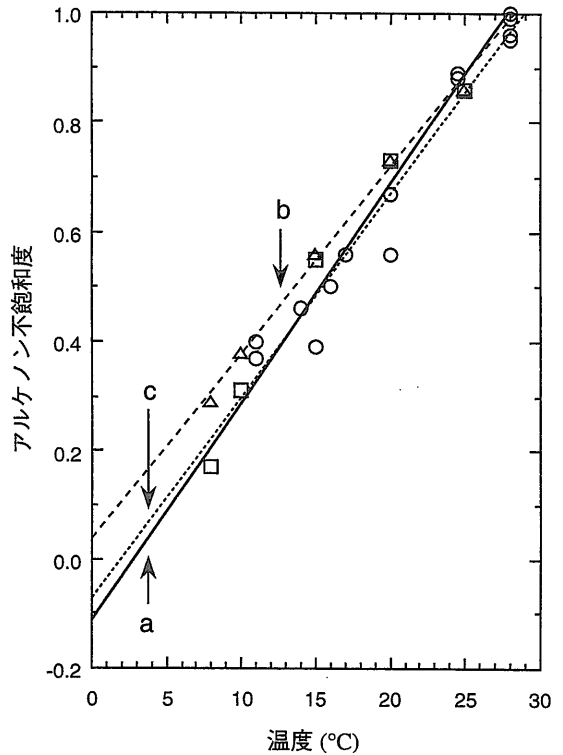
キーワード: 古水温, 古気候, 有機化合物, 堆積物, アルケノン



第1図 主な長鎖アルケノンとその類似化合物の分子構造。正式な化合物名は長いので、略号で示した。

素数37~39の2~4不飽和のケトンであり、二重結合の立体配置はすべてE型(トランス型;二重結合に対して、ある原子または原子団(ここでは水素あるいは炭素鎖)が互いに反対側にくる異性体。同じ側にくるものはZ型またはシス型という)であることがわかった(de Leeuw et al., 1980; Rechka and Maxwell, 1988)。現在では、アルケノンは広く世界各地の海底堆積物、海水中の粒子状物質の中に見いだされており、もっとも古いもので白亜紀の堆積物から検出されている(Farrimond et al., 1986)。

これらの長鎖アルケノンは、生体中には *Emiliana huxleyi* という外洋域に広く存在するプリムネシオ藻類(Prymnesiophyceae)に属する円石藻類の中に、初めて発見された(Volkman et al., 1980)。アルケノンは不飽和脂肪酸と同様、生体の中で温度に応じて膜の固さをコントロールしているのではないともいわれているが、詳しい役割についてはまだよくわかっていない。日本海溝と中央アメリカ海溝から採取された堆積物をそれぞれ調べたところ、両者のアルケノンの組成に大きな差があることがわ



第2図 アルケノン不飽和度と温度の関係。

□: U_{37}^K *E. huxleyi* 培養実験, 回帰直線 a, $U_{37}^K = 0.040T - 0.110$ (相関係数 $r^2 = 0.989$) (Prahl et al., 1988); △: U_{37}^K *E. huxleyi* 培養実験, 回帰直線 b, $U_{37}^K = 0.034T + 0.039$ (相関係数 $r^2 = 0.994$) (Prahl et al., 1988); ○: U_{37}^K 海水中の粒子状物質, 回帰直線 c, $U_{37}^K = 0.037T - 0.070$ (相関係数 $r^2 = 0.983$) (Prahl and Wakeham, 1987)

かった(Brassell et al., 1980, 1981)。そして両者のアルケノンの組成の違いは環境の違い、特にその起源である *E. huxleyi* の生育温度の違いと関係しているのではないかと考えられ、*E. huxleyi* を種々の異なる温度で培養する実験が行われた。その結果、培養温度が低温なほどアルケノンの不飽和度(二重結合が多いものが占める相対的な割合)が高くなることがわかった(Prahl and Wakeham, 1987; Prahl et al., 1988)。

アルケノンの不飽和度を表す指標として次の式で与えられる U_{37}^K 値が定義された。

$$U_{37}^K = \frac{[C_{37:2}] - [C_{37:4}]}{[C_{37:2}] + [C_{37:3}] + [C_{37:4}]}$$

ここで $C_{37:n}$ は炭素数が37で二重結合が n 個のアルケノンを示し(第1図の $C_{37:n}Me$ に相当), []内はそれぞれのアルケノンの濃度を表す。 $C_{37:4}$ の存

在量が無視できるときは、

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

で表される U_{37}^K 値を用いることもでき、これは U_{37}^K 値といわれることもある。 U_{37}^K 値を培養温度に対してプロットすると、非常によい相関関係が得られることがわかった(第2図, Prahl and Wakeham, 1987; Prahl et al., 1988)。これらの相関は、

$$U_{37}^K = 0.040T - 0.110 \quad (\text{相関係数}0.989)$$

$$U_{37}^K = 0.034T + 0.039 \quad (\text{相関係数}0.994)$$

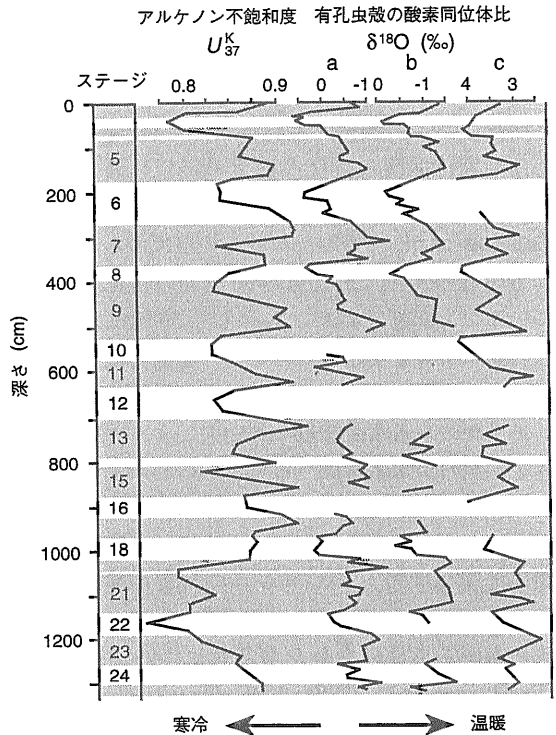
(Tは温度)と表される。

Prahl and Wakeham (1987)は、太平洋と大西洋のいくつかの地点で海水中の粒子状物質を採取し、その中に含まれるアルケノン进行分析した。そして得られた U_{37}^K 値と実測した海面温度を比較したところ、培養実験の時と同様によい相関が得られることがわかった(第2図)。 *E. huxleyi* は海洋表面に近い有光層に棲息しているので、 U_{37}^K 値は海面温度と対応している。こうしてアルケノン古水温指標が、フィールドの試料にも適用可能であることが示された。 U_{37}^K 値は後に、古海面温度の復元に使われるようになったことから、アルケノン古水温指標とも呼ばれるようになった。

E. huxleyi を動物性プランクトンに食べさせても、長鎖アルケノンはほとんど消化されずに排泄される(Volkman et al., 1980)。これはアルケノンが生物中には珍しいE型の二重結合を持っているので、生物が利用したり分解することが困難なためと考えられている。長鎖アルケノンが生物的な分解を受けにくいということは、続成作用の初期においてその保存に有利に働くので、長鎖アルケノンは古環境指標のための有機化合物として有用性が高いといえる。

2.3 アルケノン古水温指標の適用

長鎖アルケノンによる古水温復元を古気候の研究に最初に使用したのは、東部赤道大西洋(アフリカ西部沖)のケーン海裂の堆積物の研究である(Brassell et al., 1986)。堆積物は長さ約13mのコア試料で、過去100万年間の氷期/間氷期サイクルの記録が残されている。この試料についてアルケノンと、有孔虫の酸素同位体比($\delta^{18}O$ 値)の分析が行われた。その結果 U_{37}^K 値をもとにした古水温の時代変化が、氷期/間氷期サイクルに対応して緩やかな寒冷化と急激な温暖化を表す、特徴的ないわゆる「ノコギリ



第3図 ケーン海裂堆積物コア試料のアルケノン不飽和度と有孔虫酸素同位体比の記録(Brassell et al., 1986)。a: *Globigerinoides sacculifer*, b: *Globigerinoides ruder*, c: *Cibidoides wuellerstorfi* 白抜き部分は氷期、グレーの部分は間氷期。

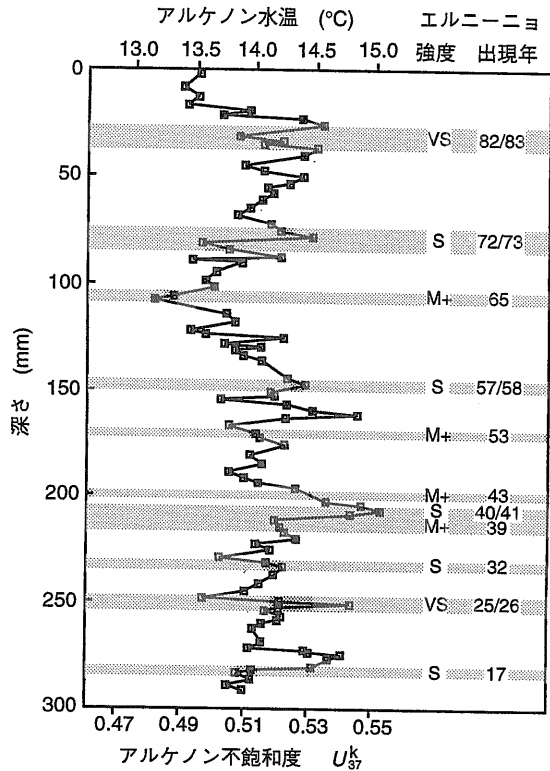
の歯」パターンを示すことがわかった(第3図)。 U_{37}^K 値の変化は、有孔虫の $\delta^{18}O$ 値の変化と全般的によく一致しているが、その変化のパターンは、底棲有孔虫(*Cibidoides wuellerstorfi*)よりも浮遊性有孔虫(*Globigerinoides sacculifer* と *Globigerinoides ruder*)の $\delta^{18}O$ 値の変化パターンとの相関が高く、このことは前述したようにアルケノンが有光層に棲む *E. huxleyi* に由来するためである。さらに特筆できる点は、堆積時の水深が炭酸塩補償深度(CCD)以深であったために有孔虫の殻が保存されず、その $\delta^{18}O$ 値が測定できない部分についても U_{37}^K 値は測定可能なことである。第3図では $\delta^{18}O$ 値のデータが欠落している部分についても、 U_{37}^K 値による古水温のデータが連続的に得られ、氷期/間氷期に対応する温度変化を与えている。また、この堆積物コアの8m以深で U_{37}^K 値と $\delta^{18}O$ 値の相関が悪くなるのは、アルケノンを生産する主要な藻類が現在と異なっていたため(*E. huxleyi* は約27万年前に出現した。

このコアの約4 m 付近)ではないかといわれている (Brassell et al., 1986).

アルケノン古水温指標を使って古気候変動を調べる研究が、この後次々と行われ、氷期/間氷期に対応する海面温度の変化の様子が詳しく調べられた (Poynter et al., 1989; Jasper and Gagosian, 1989; Eglinton et al., 1992). これらの結果から、一般的に U_{37}^K 値の変化と有孔虫の $\delta^{18}O$ 値の変化が一致していることが示された。しかし $\delta^{18}O$ 値は氷床体積の変動に影響を受けることから、海面温度との対応がより正確であるのは U_{37}^K 値であると考えられた。

アルケノン古水温指標を用いて、より短いタイムスケールの出来事を調べる試みも行われている。エルニーニョ現象はペルー沖合の広い海域の海面水温が異常に上昇する現象で、3~10年の不規則な時間間隔で発生する。エルニーニョ現象の発生と U_{37}^K 値の相関を調べる研究が、まずペルー沖の湧昇流海域の海底から採取された堆積物について行われた (Farrington et al., 1988; McCaffrey et al., 1990). 過去300年間の記録が調べられ、非常に強いエルニーニョ現象が頻発した1870-1891年の期間で、 U_{37}^K 値による海面水温はその前後の期間に比べて1.5°C程度有意に高かった (McCaffrey et al., 1990). しかしそれ以外の時においては、その発生と U_{37}^K 値による海面水温の相関を論ずるにはデータ量が不十分であった。この後カリフォルニア沖のサンタバーバラ海盆から採取された、ラミナの発達した堆積物についての研究が行われた (Kennedy and Brassell, 1992). 約30 cm の長さの堆積物から、肉眼で2-4 mm のラミナを1枚ずつはがしてサンプリングが行われ、1年ないしはそれ以下の時間間隔で過去80年分の記録が得られた。分析の結果強いエルニーニョ現象発生時には、 U_{37}^K 値による海面水温はその前後の期間に比べて約1°C高くなるという明確な相関関係が見いだされた(第4図)。このことは適切なサンプルを用いれば、アルケノン古水温指標によって1年単位のような短いタイムスケールの古水温の変動を調べることもできることを示している。

最近では、アルケノン古水温指標の適用の範囲はさらに拡大されている。 U_{37}^K 値から求めた古水温を有孔虫の $\delta^{18}O$ 値などと組み合わせ、古海洋の塩分濃度を算出した研究 (Rostek et al., 1993) や、アルケノンの $\delta^{13}C$ 値と U_{37}^K 値および有孔虫の $\delta^{18}O$ 値



第4図 サンタバーバラ海盆堆積物のアルケノン不飽和度の記録：エルニーニョ現象と古水温の関連 (Kennedy and Brassell, 1992). グレーの部分が発エルニーニョ現象が発生した時期。強度 VS: 非常に強, S: 強, M+: 中~強。

から古水温とそこに溶存していた CO_2 の濃度を求め、それから大気中の CO_2 分圧の地質時代における変化を復元する研究 (Jasper and Hays, 1990) などが行われている。 CO_2 分圧の復元の研究は、本特集号 Part I (坂田・金子, 1995) に詳しく書かれているので、そちらを参照されたい。

2.4 アルケノン古水温指標の問題点

以上述べてきたように、長鎖アルケノン分析で得られる U_{37}^K 値は古水温指標としてきわめて有用であるが、この方法にも適用に注意しなければならない場合が存在する。ひとつは Brassell et al. (1986) の研究でも明らかにされたように、堆積物の年代が古い場合である。長鎖アルケノンのグループは少なくとも4500万年前からゲオフィロコプサ藻類 (Gephyrocapsaceae) が生産していたが (Marlowe et al., 1990), U_{37}^K 値を計算する上で起源としている *E. huxleyi* が出現したのは約27万年前である。した

がって *E. huxleyi* 出現以前の時代の堆積物の U_{37} 値を取り扱うには注意が必要である。古い時代のサンプルを対象とするときは、場合によってはアルケノンを生産していた藻類の種に応じて U_{37} 値を補正する必要がある。

もうひとつの問題としては、アルケノンが *E. huxleyi* に由来していても海面水温がかなり低い場合には、従来の U_{37} 値と水温の関係式が成り立たない場合があることである。オーストラリア南方の海域で海中の粒子状物質が採取され、長鎖アルケノンの分析が行われた (Sikes and Volkman, 1993)。この海域の円石藻類の中では *E. huxleyi* の存在量が卓越していること、検出された化合物の組成が *E. huxleyi* の培養実験の結果ときわめてよく一致していることから、アルケノンは *E. huxleyi* に由来しているものとされた。しかし U_{37} 値と実測された海面温度は従来の関係式から導かれる直線上には乗らず、測定データを温度に適合させるには曲線を表す関数が必要になるという (Sikes and Volkman, 1993)。

この他にも最近では、沿岸域などに棲息する円石藻である、*Gephyrocapsa oceanica* もアルケノンを生産することがわかり、培養実験の結果アルケノンの組成と温度との相関が、*E. huxleyi* の場合と異なる直線に乗ることが示された (Volkman et al., 1995)。これによると、従来の *E. huxleyi* による U_{37} 値と水温の関係式を一律にすべてのサンプルに当てはめることには注意しなければならない。

湖沼堆積物中にも長鎖アルケノンは見いだされているが、*E. huxleyi* は湖沼には棲息していないので、アルケノンの組成は海洋堆積物のものと異なる (Cranwell, 1985)。湖沼堆積物のアルケノン組成から古水温を復元するには、 U_{37} 値と水温との関係式を新たに導くなどの方法を取らねばならない。

2.5 その他の有機化合物

海中の粒子状物質の研究から、アルケノンと、それに構造が類似した化合物を用いた AA_{36} 比という温度指標が報告されている (Conte et al., 1992)。 AA_{36} 比は、次の式で定義されている。

$$AA_{36} = [38:3 \text{ Et}] / ([36:3 \text{ OMe}] + [36:2 \text{ OMe}] + [38:3 \text{ Et}])$$

38:3 Et は炭素数38で二重結合3個のアルケノンであり、36:n OMe は、炭素数36で二重結合 n 個

のアルケノンに対応するカルボン酸のメチルエステル (アルキルアルケノイトと総称される) である (第1図参照)。水温が低い場合は、アルキルアルケノイトの量が多くなること、 U_{37} 値よりも AA_{36} 比の方が水温との相関直線の傾きが大きくなることから、 AA_{36} 比は特に低温域で有用と説明されている。さらに、 AA_{36} 比と U_{37} 値を組み合わせた水温指標が考案され、その有効性が検討されている (Conte et al., 1992; Conte and Eglinton, 1993)。

堆積物中には生物起源の種々のステロール類が見いだされるが、ステロールを用いた温度指標も報告されている。地中海のサブオペル (有機物に富んだ泥質堆積物) の研究で、ある種のステロールの量比をとると、その値が別に求められた U_{37} 値とよい相関を持つことがわかった (ten Haven, et al., 1987)。この比はステロール温度指標といわれている。

ここにあげたようなアルケノン以外の有機化合物を用いた水温指標については、まだ報告例が少ない。したがってこれらの指標の信頼性、有用性が高いかどうかは、さらなる研究による検証が必要であろう。

3. おわりに

アルケノン古水温指標を用いた古気候 (古水温) の復元は、近年の有機地球化学の分野での大きな成果のひとつといえよう。堆積物に残された有機化合物から、過去の環境を復元できることが明確に示された意義は大きい。堆積物中には、膨大な種類の生物由来の有機化合物が存在する。それらの中から古環境復元に役立つ化合物を見つけたこと、その有効性を検証すること、そしてそれらを用いた新たな方法による、古環境復元の研究が今後発展すると考えられる。

文 献

- Boon, J. J., van der Meer, F. W., Schuyf, P. J. W., de Leeuw, J. W., Schenck, P. A. and Burlingame, A. L. (1978): In: Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Vols 38, 39, 40 and 41, Supplement, Walvis Ridge DSDP Leg 40, pp. 627-637. U. S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Brassell, S. C. (1993): Applications of biomarkers for delineating marine paleoclimatic fluctuations during the Pleistocene. In: Organic Geochemistry, principles and applications, Engel, M. H. and Macko, S. A. eds. pp. 699-738. Plenum Press.

- Brassell, S. C., Comet, P. A., Eglinton, G., Isaacson, P. J., McEvoy, J., Maxwell, J. R., Thomson, I. D., Tibbetts, P. J. C. and Volkman, J. K. (1980): Preliminary lipid analyses of Sections 440A-7-6, 440B-3-5, 440B-8-4, 440B-68-2, and 436-11-4: Legs 56 and 57. In: Initial Report of the Deep Sea Drilling Project, Vol. 56/57(2), pp. 1367-1390. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Brassell, S. C., Eglinton, G. and Maxwell, J. R. (1981): Preliminary lipid analyses of two Quaternary sediments from the Middle America Trench, southern Mexico Transect. In: Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, Vol 66, pp. 557-580. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- 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.
- Conte, M. H. and Eglinton, G. (1993): Alkenone and alkenoate distributions within the euphotic zone of the eastern North Atlantic: correlation with production temperature. *Deep Sea Research I*, **40**, 1935-1961.
- Conte, M. H., Eglinton, G. and Madureira, L. A. S. (1992): Long-chain alkenones and alkyl alkenoates as palaeotemperature indicators: their production, flux and early sedimentary diagenesis in the Eastern North Atlantic. In: *Advances in Organic Geochemistry 1991*, Eckardt, C. B., Larter, S. R., Manning, D. A. and Maxwell, J. R. eds. pp. 287-298. Pergamon Press, Oxford.
- Cranwell, P. A. (1985): Long-chain unsaturated ketones in recent lacustrine sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**, 1545-1551.
- Eglinton, G., Bradshaw, S. A., Rosell, A., Sarnthein, M., Pflaumann, U. and Tiedemann, R. (1992): Molecular record of secular sea surface temperature changes on 100-year timescales for glacial terminations I, II and IV. *Nature*, **356**, 423-426.
- Farrimond, P., Eglinton, G. and Brassell, S. C. (1986): Alkenones in Cretaceous black shales, Blake-Bahama Basin, western North Atlantic. In: *Advances in Organic Geochemistry 1985*, Leythaeuser, D. and Rulkotter, J. eds. pp. 897-903. Pergamon Press, Oxford.
- Farrington, J. W., Davis, A. C., Sulanowski, J., McCaffrey, M. A., McCarthy, M., Clifford, C. H., Dickinson, P. and Volkman, J. K. (1988): Biogeochemistry of lipids in surface sediments of the Peru upwelling area at 15°S. In: *Advances in Organic Geochemistry 1987*, Mattavelli, L. and Novelli, L. eds. pp. 607-617. Pergamon Press, Oxford.
- ten Haven, H. L., Baas, M., Kroot, M., de Leeuw, J. W., Schenck, P. A. and Ebbing, J. (1987): Late Quaternary Mediterranean sapropels. III: Assessment of source of input and palaeotemperature as derived from biological markers. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **51**, 803-810.
- Jasper, J. P. and Gagosian, R. B. (1989): Alkenone molecular stratigraphy in an oceanic environment affected by glacial freshwater events. *Paleoceanography*, **4**, 603-614.
- Jasper, J. P. and Hayes, J. M. (1990): A carbon isotope record of CO₂ levels during the late Quaternary. *Nature*, **347**, 462-464.
- Kawamura, K. and Ishiwatari, R. (1981): Polyunsaturated fatty acids in a lacustrine sediment as a possible indicator of paleoclimate. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **45**, 149-155.
- Kennedy, J. A. and Brassell, S. C. (1992): Molecular records of twentieth-century El Niño events in laminated sediments from the Santa Barbara basin. *Nature*, **357**, 62-64.
- de Leeuw, J. W., van der Meer, F. W., Rijpstra, W. I. C. and Schenck, P. A. (1980): On the occurrence and structural identification of long chain unsaturated ketones and hydrocarbons in sediments. In: *Advances in Organic Geochemistry 1979*, Douglas, A. G. and Maxwell, J. R. eds. pp. 211-217. Pergamon Press, Oxford.
- 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. *Chem. Geol.*, **88**, 349-375.
- McCaffrey, M. A., Farrington, J. W. and Repeta, D. J. (1990): The organic geochemistry of Peru margin surface sediments: I. A comparison of the C₃₇ alkenone and historical El Niño records. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 1671-1682.
- Poynter, J. G., Farrimond, P., Brassell, S. C. and Eglinton, G. (1989): Molecular stratigraphic study of sediments from Holes 658A and 660A, Leg 108. In: *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, Ruddiman, W., Sarnthein, M. et al., eds. Vol 108, pp. 387-394. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- 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. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 2303-2310.
- Rechka, J. A. and Maxwell, J. R. (1988): Unusual long chain ketones of algal origin. *Tetrahedron Lett.*, **29**, 2599-2600.
- Rostek, F., Ruhland, G., Bassnot, F. C., Müller, P. J., Labeyrie, L. D., Lancelot, Y. and Bard, E. (1993): Reconstructing sea surface temperature and salinity using δ¹⁸O and alkenone records. *Nature*, **364**, 319-321.
- 坂田 将・金子信行(1995): ガスクロマトグラフ燃焼質量分析計(GC/C/MS)による有機化合物の炭素同位体比の測定と地球化学的応用. *地質ニュース*, no. 487, 45-51.
- Sikes, E. L. and Volkman, J. K. (1993): Calibration of alkenone unsaturation ratios (UK'37) for paleotemperature estimation in cold polar waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **57**, 1883-1889.
- 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: *Advances in Organic Geochemistry 1979*, Douglas, A. G. and Maxwell, J. R. eds. pp. 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. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **59**, 513-520.

KOMIYA Masatoshi and TERASHIMA Minako (1995):
Palaeoclimatic assessment using organic compounds
in sediments.

<受付: 1994年12月20日>