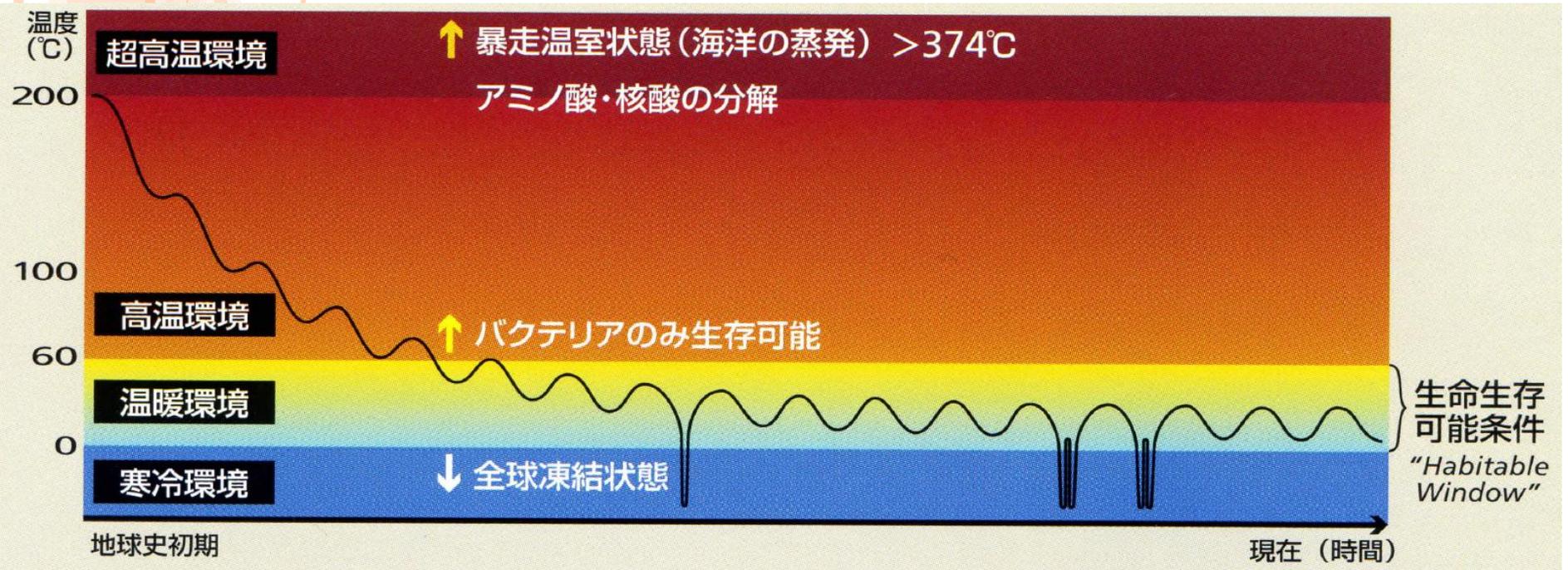
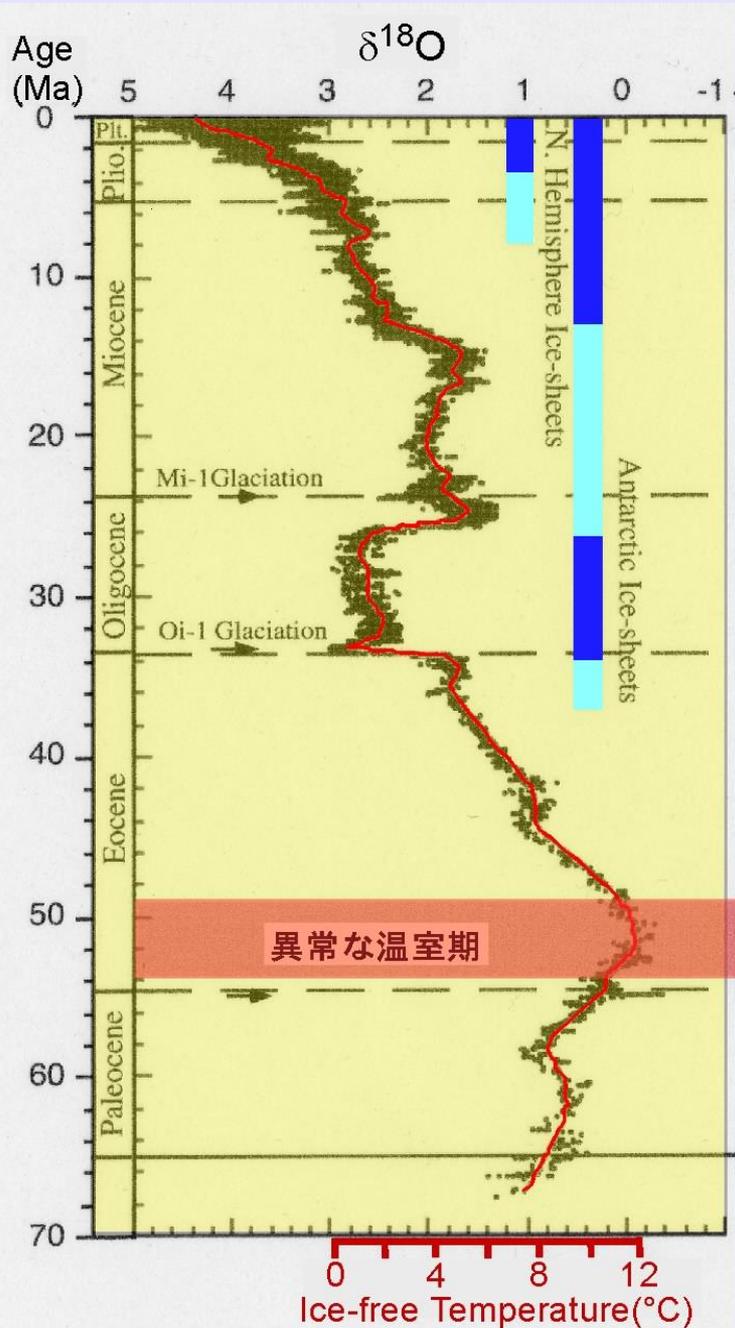


III. 地球表層(大気)の温度変動



地球環境進化の概念図(田近, 2004)



← アフリカに人類誕生
 ← C4草本植物の拡大
 ← 最初のヒト科出現

← サンゴの大絶滅
 ← ヒゲクジラ出現

← 底生有孔虫の大絶滅
 ← 陸上ほ乳類の大移動
 ← 恐竜など大絶滅

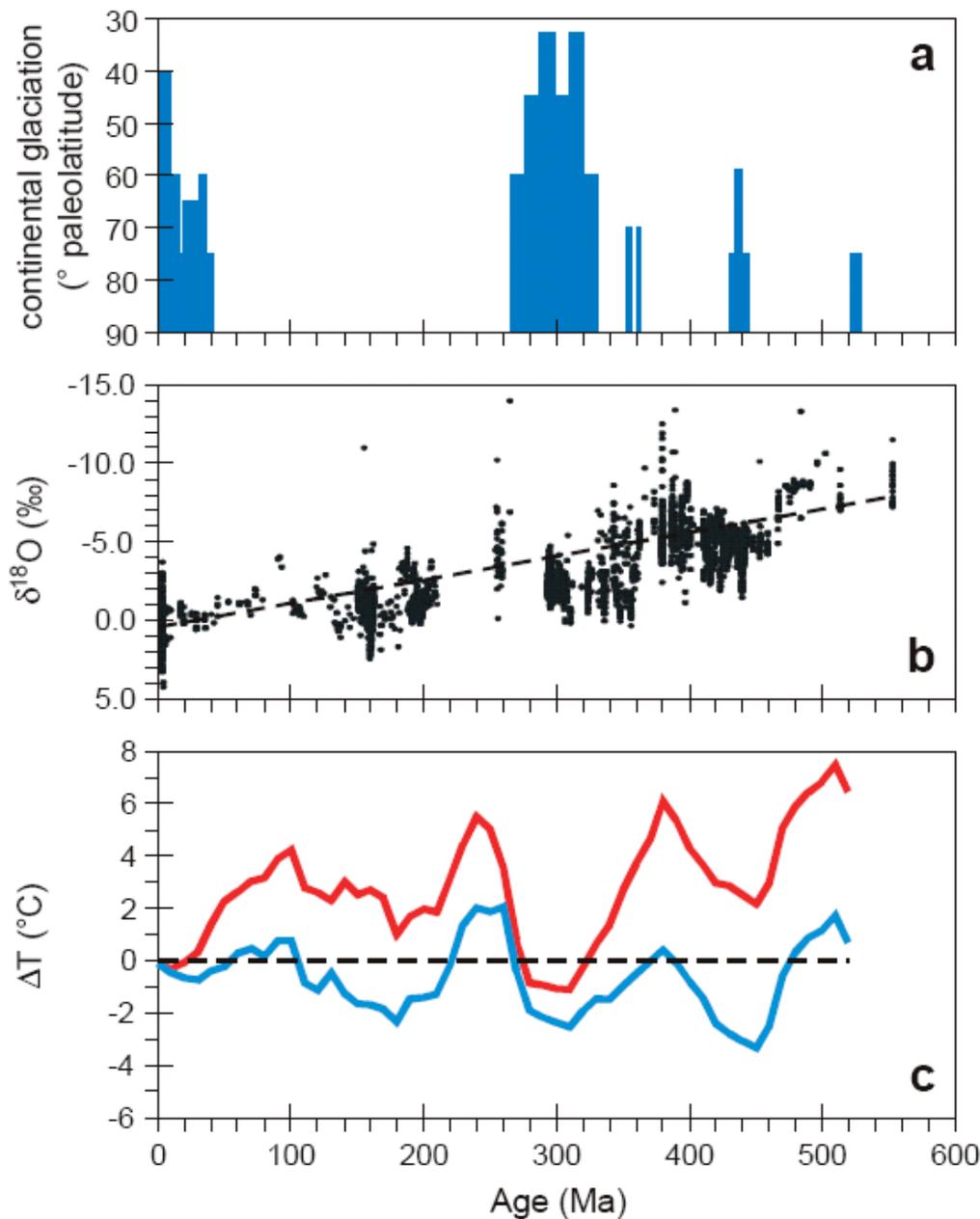
■ パナマ地峡接続
 ▲ モンスーンの強化
 ■ 北米西部での大火山活動

■ ドレーク海峡開通
 ■ タスマニア海峡開通
 ■ 海洋底拡大の減衰

■ 北大西洋拡大
 ■ インドがアジアに衝突
 ← 小天体の衝突

■ Partial or Ephemeral
 ■ Full Scale and Permanent

0 4 8 12
 Ice-free Temperature(°C)



過去6億年の陸上 気候の変遷

Fig. 7. Phanerozoic climate change. (a) Inferred occurrence and latitudinal extent of continental glaciation (Crowley, 1998). (b)

Ridgwell, 2005



6億年間の地球環境変動

- 活発な火山活動
- 高CO₂濃度
- 温暖～寒冷気候
- 高～低海水準

(G) Percent of world's original petroleum reserves generated by source rocks (Klemme & Ulminshek, 1991)

(F) Percentage extinction of marine genera (Raup & Sepkoski, 1986) & major Oceanic Anoxic Events

海水準

気温

CO₂

海洋地殻生産

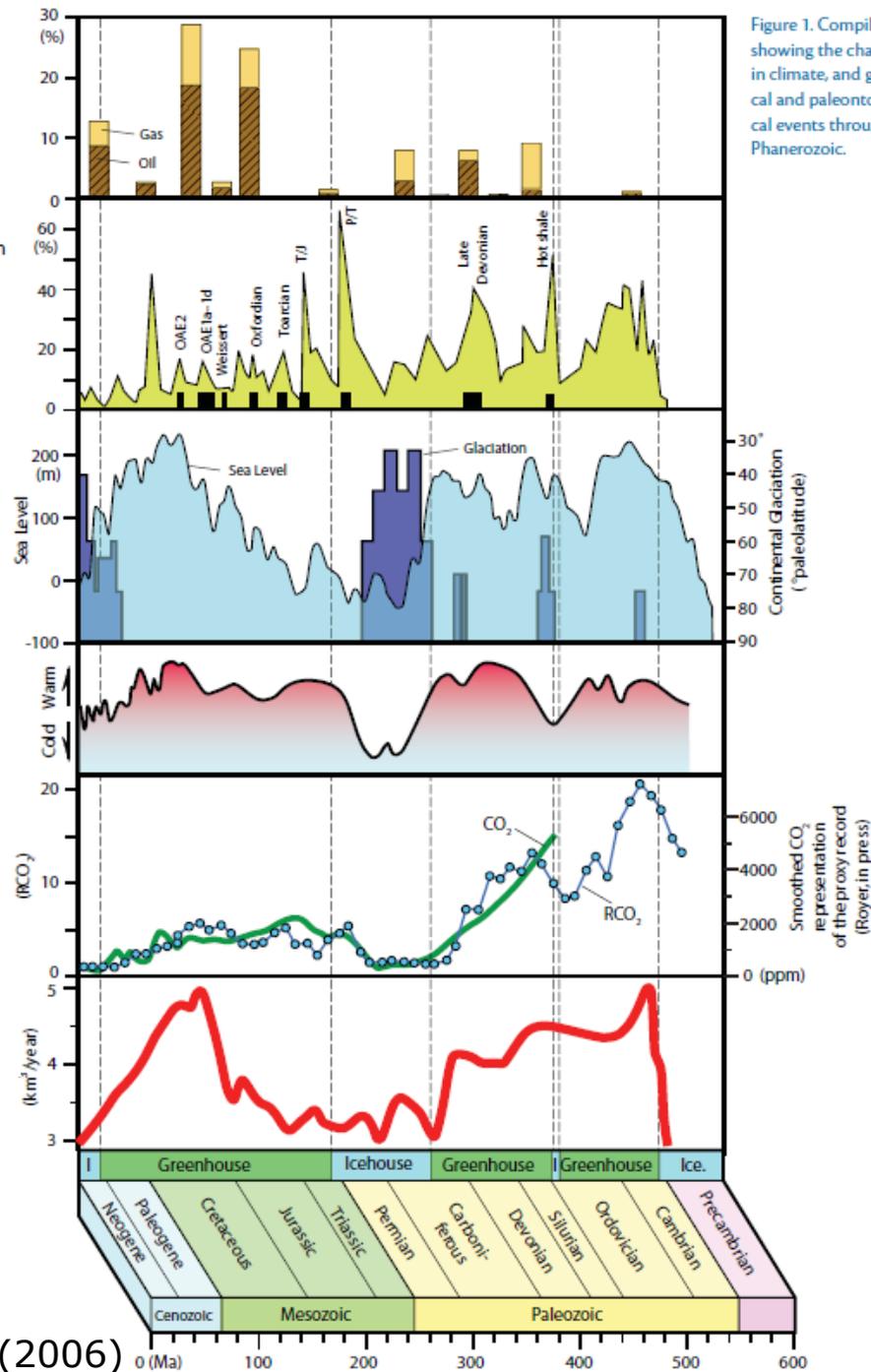


Figure 1. Compilation showing the changes in climate, and geological and paleontological events through the Phanerozoic.

GLOBAL
PALEOGEOGRAPHIC VIEWS
OF EARTH HISTORY -
LATE PRECAMBRIAN TO
RECENT

NORTHERN ARIZONA
UNIVERSITY
PROFESSOR OF GEOLOGY
DR. RON BLAKEY

600 Ma Late
Precambrian

South Polar view

<http://jan.ucc.nau.edu/~rcb7/globaltext2.html>

酸素同位体温度計:

EPSTEIN ET AL. (1953) 二枚貝の温度スケール

$$T = 16.5 - 4.3 (\Delta - \Delta W) + 0.14 (\Delta - \Delta W)^2$$

Δ : 炭酸塩硬組織の $\Delta^{18}\text{O}$

ΔW : 海水の $\Delta^{18}\text{O}$

- <条件>
- 同位体比測定精度が十分に高い
- 生物が固定した CaCO_3 と海水の間に酸素同位体交換平衡が成立している
- 同位体比が堆積後も変化しない
- 化石硬組織が生成した当時の海水の酸素同位体比が知られている



地球全史の気候変動

Aeon	Era	duration in millions of years	millions of years ago	
Phanerozoic	Cenozoic	65	5	
	Mesozoic	183	248	
	Palaeozoic	295	543	
Precambrian	Proterozoic	Late	357	
		Middle	700	
		Early	900	
	Archaean	Late	500	
		Middle	400	
		Early	400	
		Hadean	800	
				4600

← first shelly fossils (Cambrian explosion)
 ← Snowball Earth ice ages

←
 ←
 } warm

← rise of atmospheric oxygen (ice age)

← Ice age (?)

←
 } warm (?)

Kasting and Howard
 (2006) Phil. Trans. R. Soc. B, 361,
 1733–1742

Fig. Geologic time-scale showing major climatic and evolutionary events during the Precambrian Era.



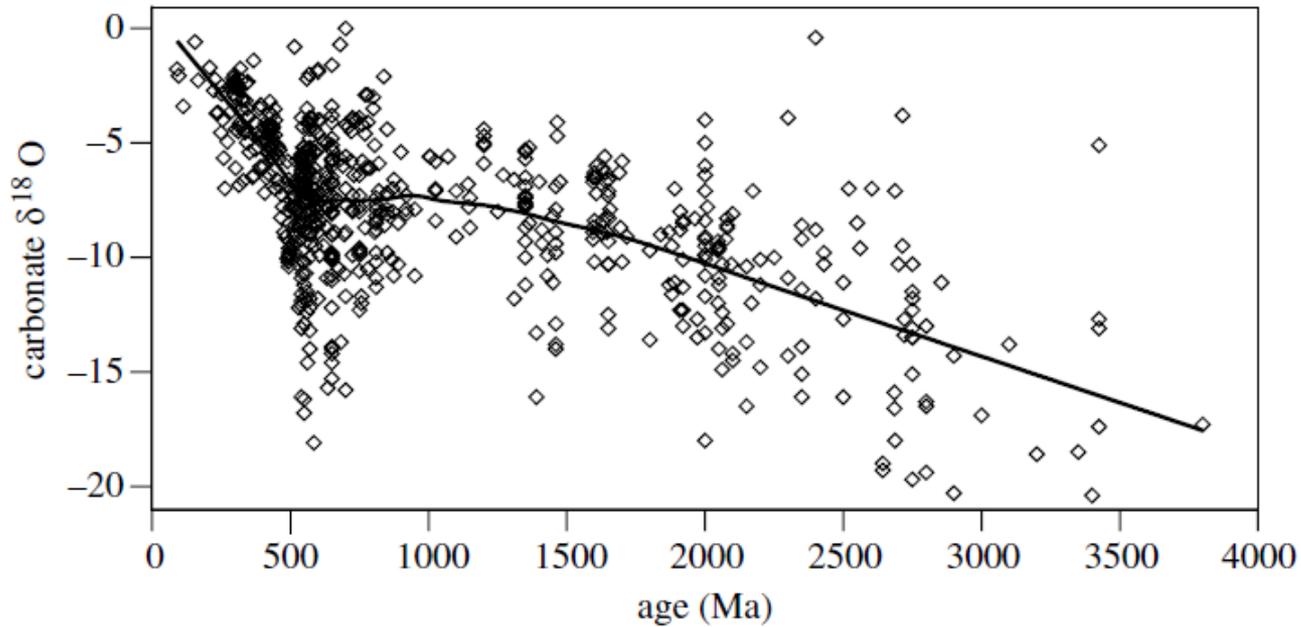
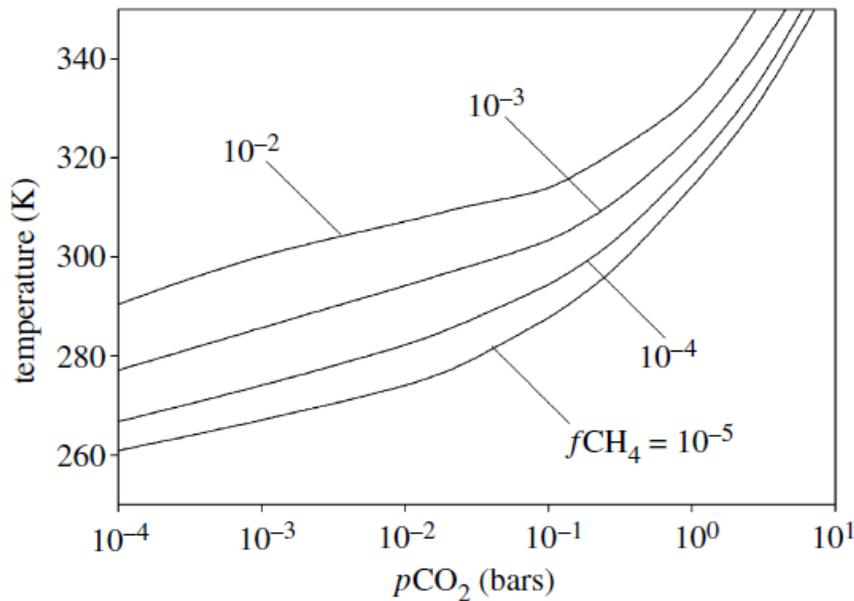


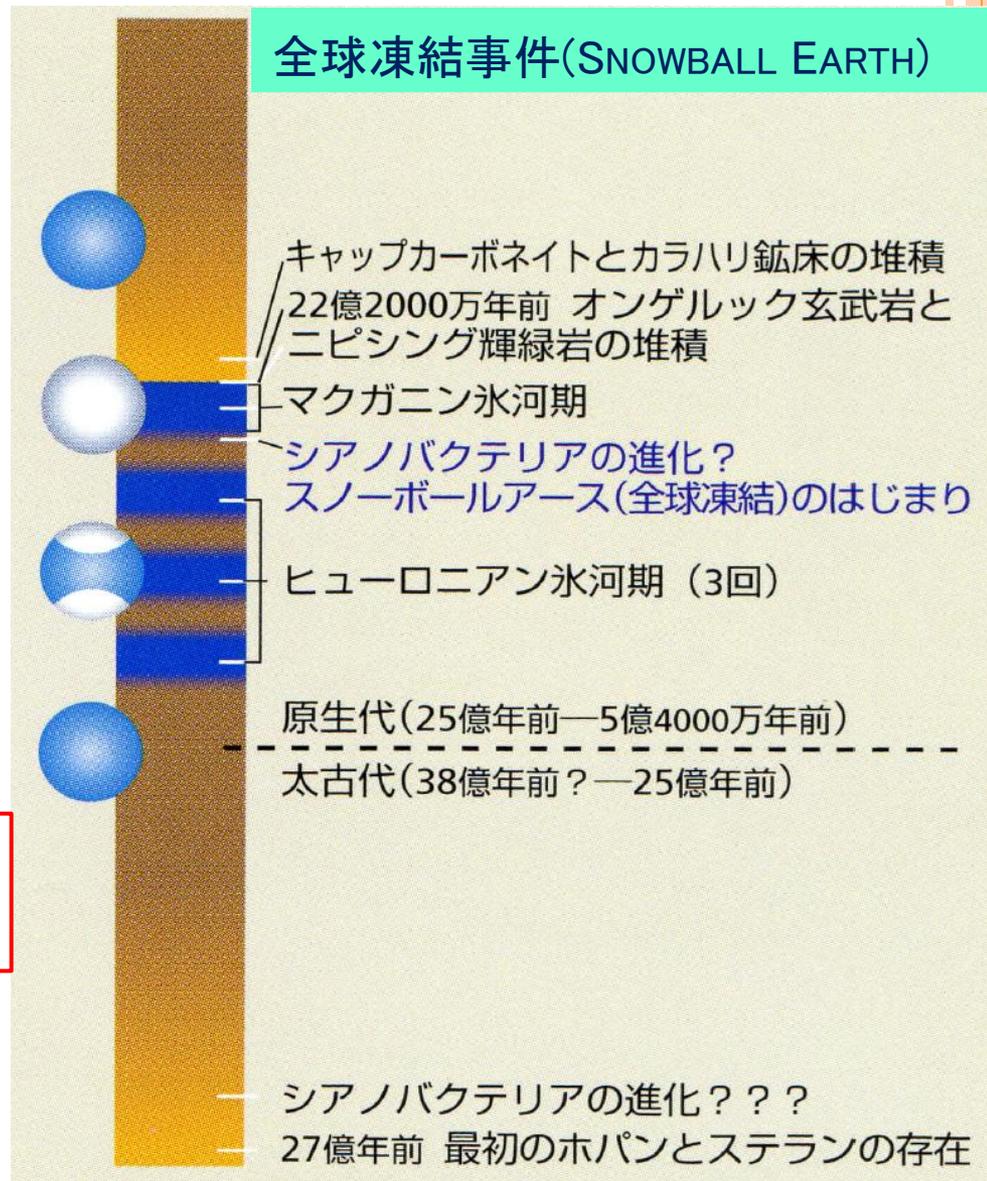
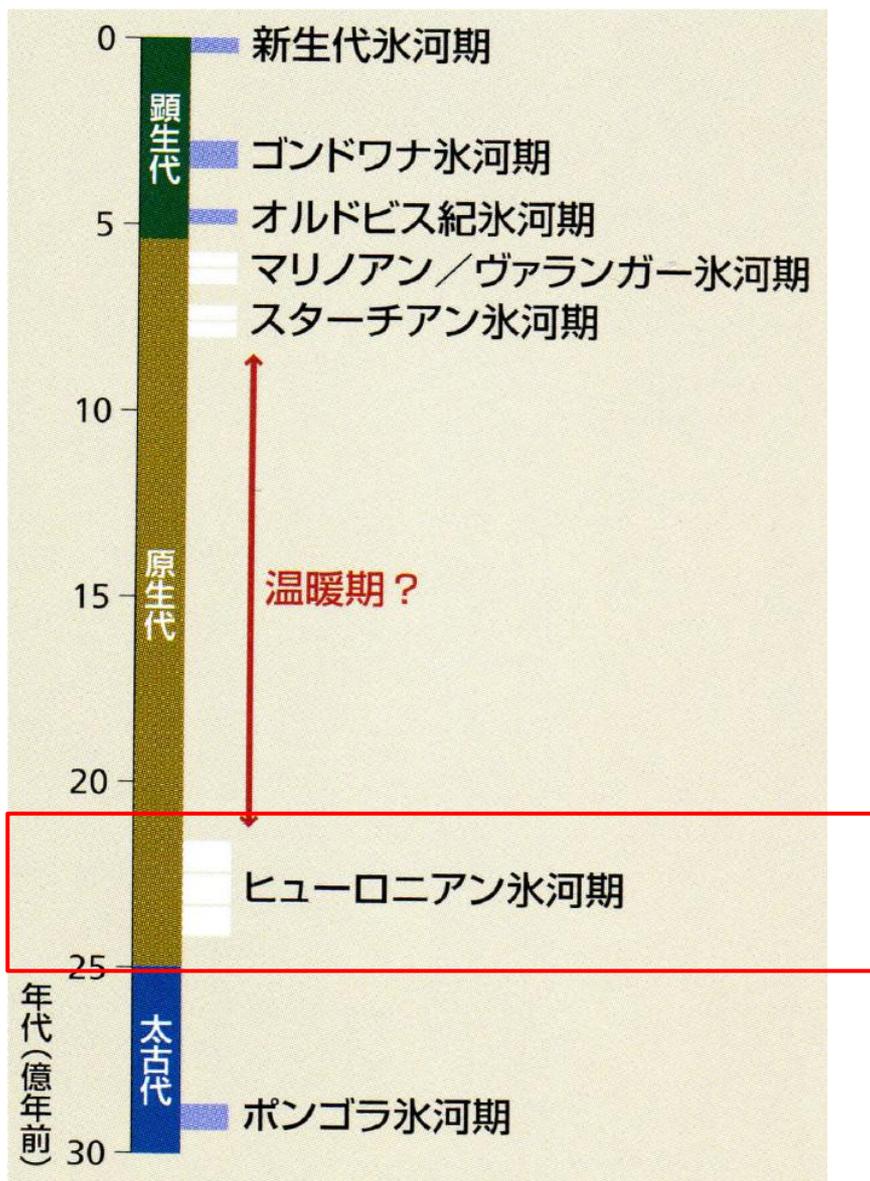
Fig. Average $\delta^{18}\text{O}$ of marine carbonates deposited over the past 3.4 Ga, compiled by Jaffres (2005).



Kasting and Howard (2006)

Fig. Surface temperature as a function of CO_2 partial pressure and CH_4 mixing ratio.





全球凍結事件(スノーボールアース仮説)

○ J. L. Kirschvink, 1992

22億年前(24.5~22億年前) - 氷床が赤道まで達していた

→ 地球表面全域が凍結 → ‘スノーボール仮説’

大規模Mn鉱床の出現 → 還元剤、O₂増加

真核生物の出現を促進した。

○ P. F. Hoffman, 1998

7億年前(7.3~6.35億年前) - ナミビア北部オタビ地域における $\delta^{13}\text{C}$ 層序による研究 → 氷河堆積物を確認

→ ‘スノーボール仮説’の復活

炭酸塩層(Cap carbonate)の上下で $\delta^{13}\text{C}$ 値が
negative shift

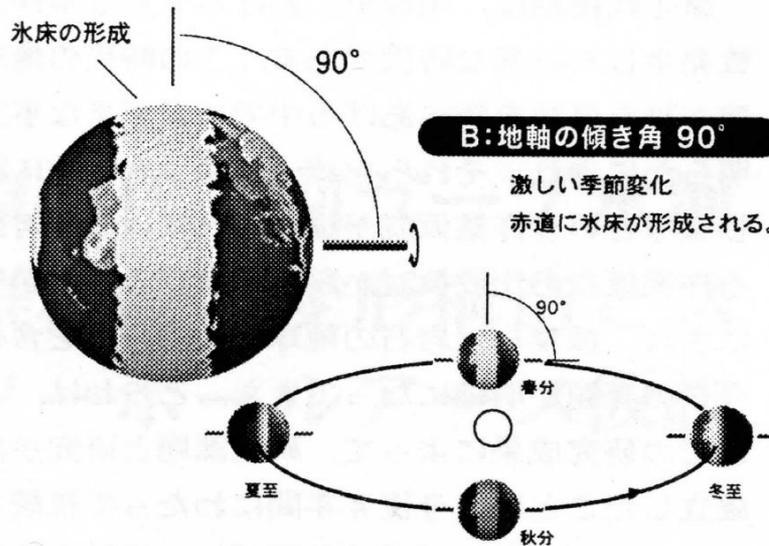
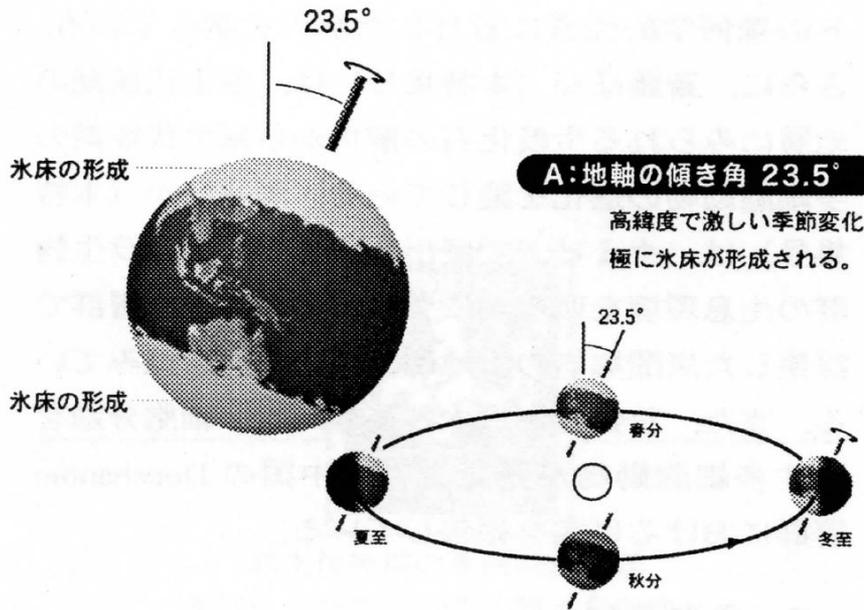
→ 海洋における生物生産の減少

多細胞生物の進化を促進した。



スノーボールアース 仮説の異説

WILLIAMS(1993)GEOPHYS.S
CI. REV.
川上ら(2004)引用



生命は、寒冷期をいかに越えるか

- 2度の全球凍結後に、生物生産の極端な増加が起こる。
→進化の促進時期
- 温泉の周囲で生き残る.
- 生物の耐寒性、耐凍性の獲得.
- 陸上植物出現におけるGraham仮説
耐乾燥性の獲得 → 陸上植物を発生させるきっかけとなった
- オルドビス末～シルルはじめの氷河期
→淡水域に進出していたシャジクソウ類から進化した。
抵抗性高分子(クチン、リグニンの合成)



IV. 生命の温度適応(順化)と古温度計 (PALEOTHERMOMETRY)

○ 耐寒性、耐凍性

耐寒性—1) 冬の乾燥に対する抵抗性

2) 氷点下の温度に対する抵抗性

・凍結耐性—細胞外凍結
(耐凍性) 器官外凍結

・凍結回避—過冷却

- 過冷却(supercooling)
- 氷核活性(Ice nuclear activity)と抗氷核活性
- 不凍タンパク質(Anti-freezed protein)
- 細胞外凍結(extracellular freezing)
- 細胞内凍結(intracellular freezing)～
- 器官外凍結

○ 温度変化に対する順化

膜脂質による膜の流動性の維持 → 不飽和脂肪酸など



器官外凍結

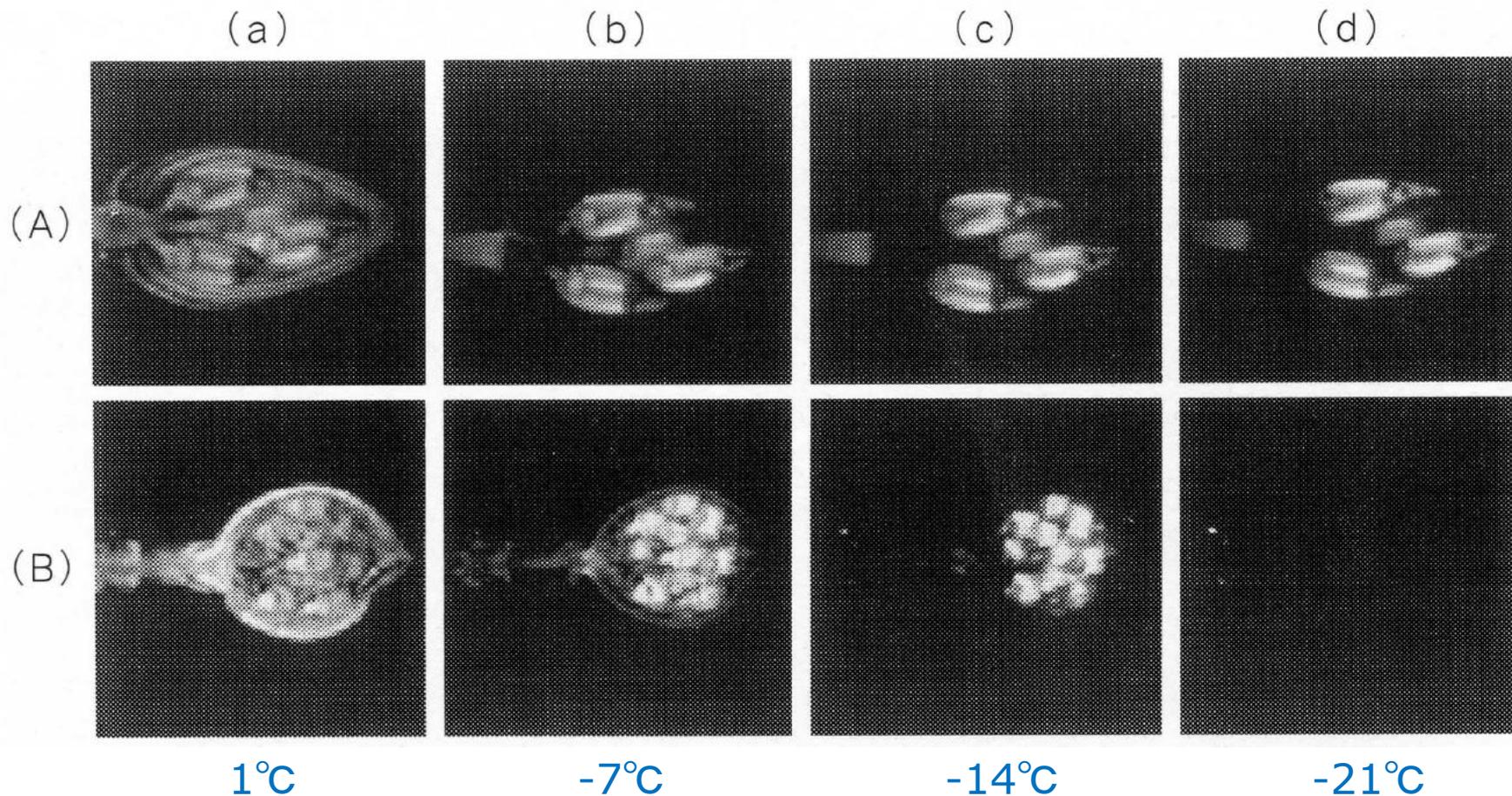


Fig. 花芽の凍結とNMR imaging (石川雅也, 1998)
(A) レンゲツツジ, (B) サンシュユ.



細胞外凍結

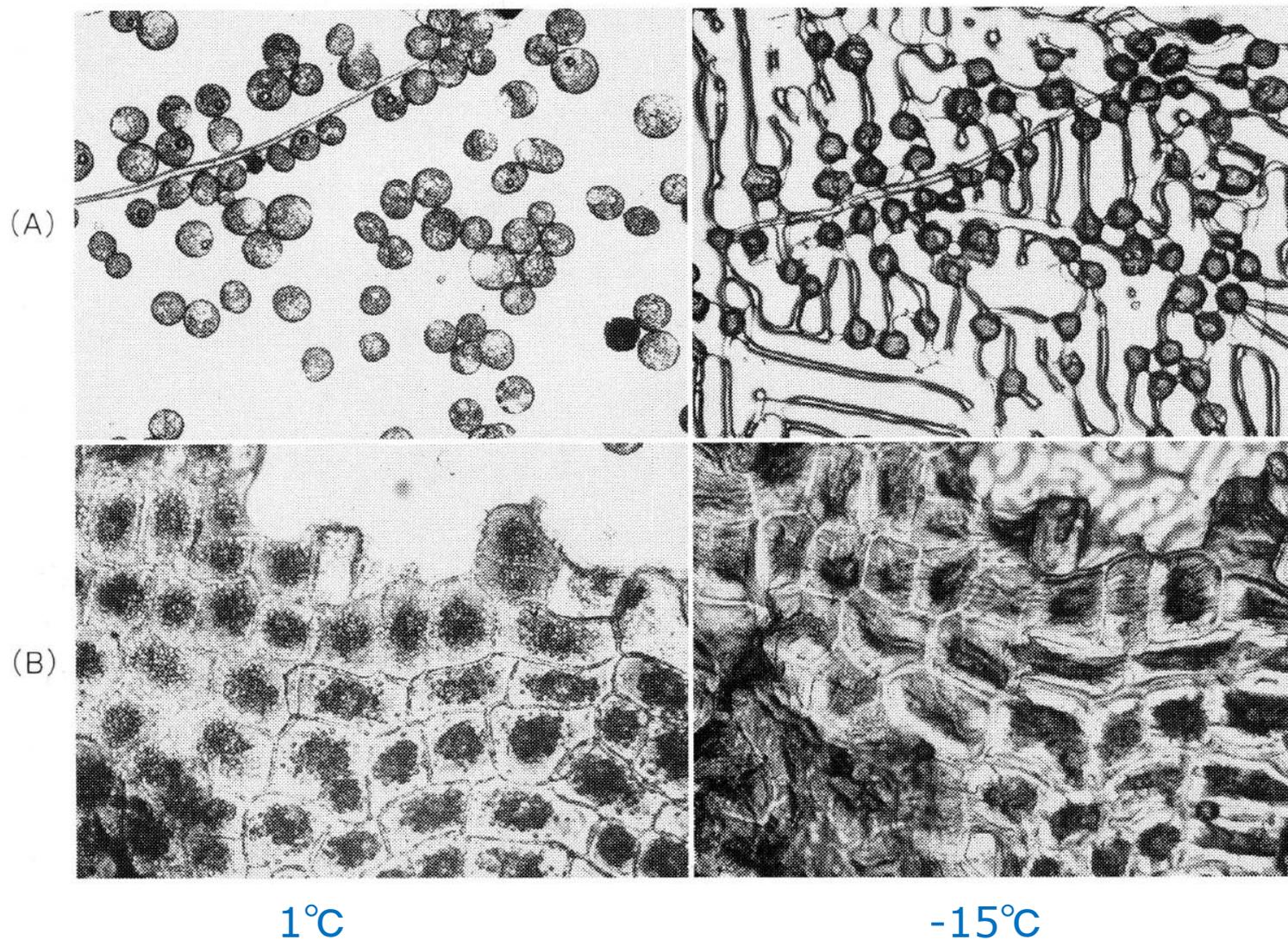


Fig. 越冬中の植物の細胞外凍結の顕微鏡像(石川雅也, 1998)
(A) エゾナニワズ葉由来プロトプラスト, (B)エゾニワトコ皮層細胞.



凍結阻害タンパク質

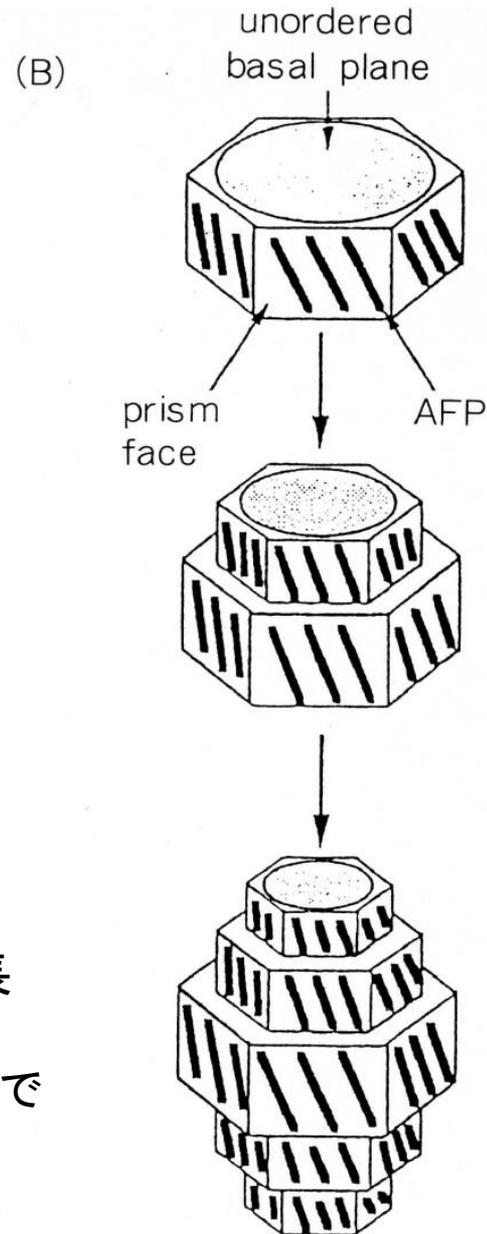
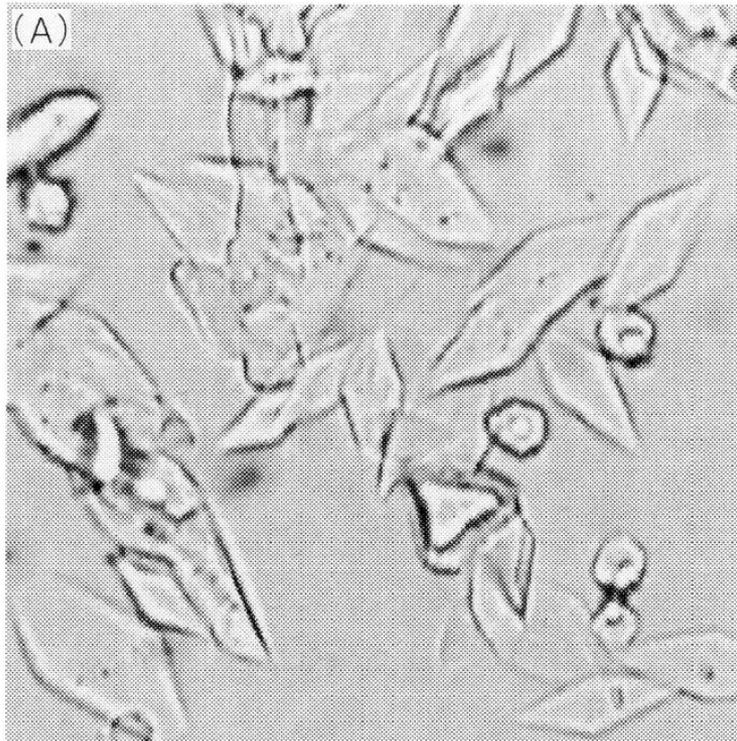
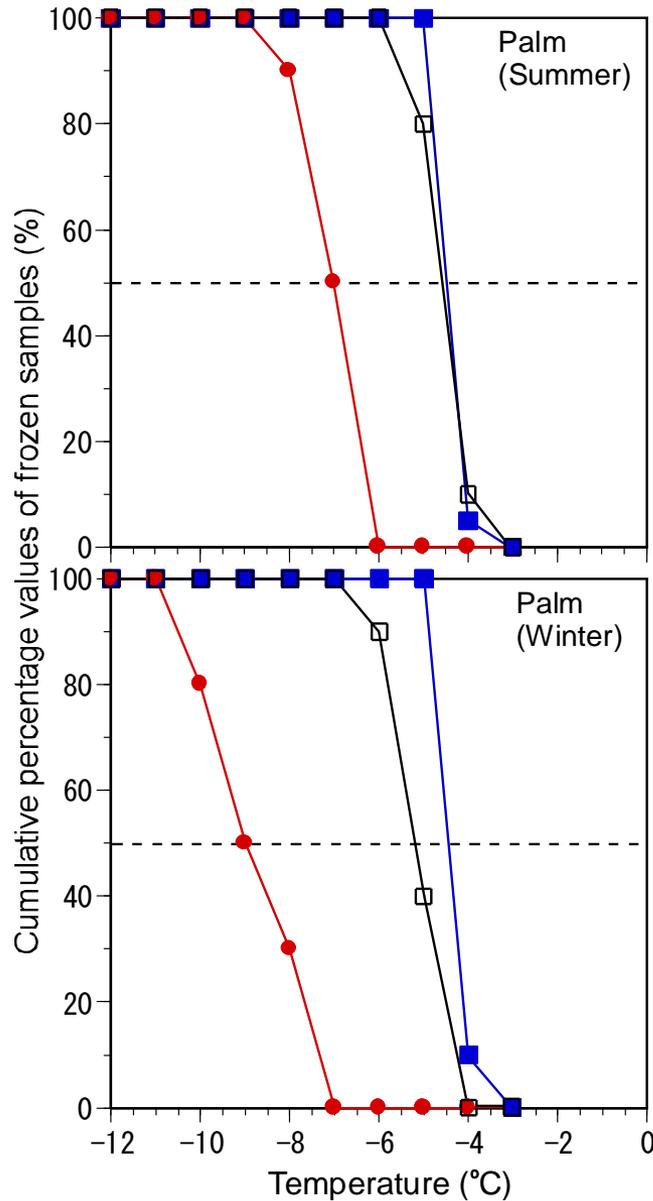


Fig. 凍結阻害タンパク質 (AFP) と氷結晶の成長
(石川雅也, 1998)
(A) AFP 共存下での氷結晶, (B) A) AFP 共存下での氷結晶成長のモデル.



抗氷核活性



	$T_m(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_m(^{\circ}\text{C})$
Control	-4.5	-
Palm(S)Ext.1&2	-7.0	2.5
Palm(S)Ext.3	-4.6	0.1

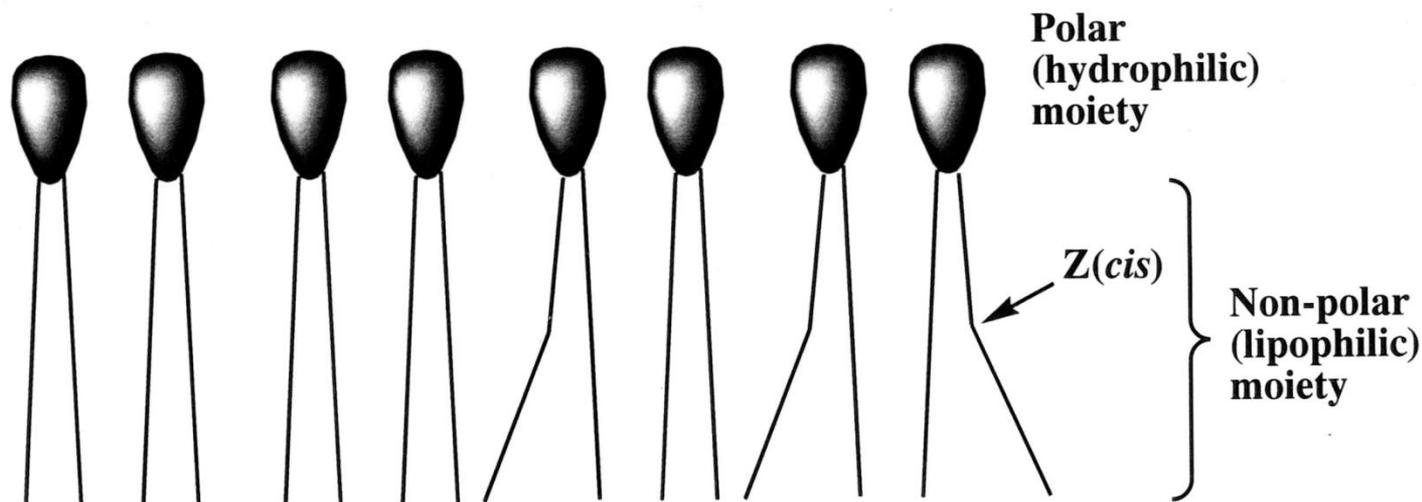
	$T_m(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_m(^{\circ}\text{C})$
Control	-4.4	-
Palm(W)Ext.1&2	-9.0	4.6
Palm(W)Ext.3	-5.2	0.8

Fig. シュロ葉の抽出液の抗氷核活性実験 (Sawada and Ishikawa, 2001). 冬の葉の活性が高い。



耐寒性・耐凍性が生物の分布を決めるもっとも重要な要素である、という考え方.

温度順化 - ‘枠’が決まった中での温度の適応能力
多不飽和脂肪酸の合成



気候プロキシー (climate proxy)

環境変化 - 生物の応答

地球環境



生物

プロキシー(proxy):
気候・環境の代理(代替)
指標

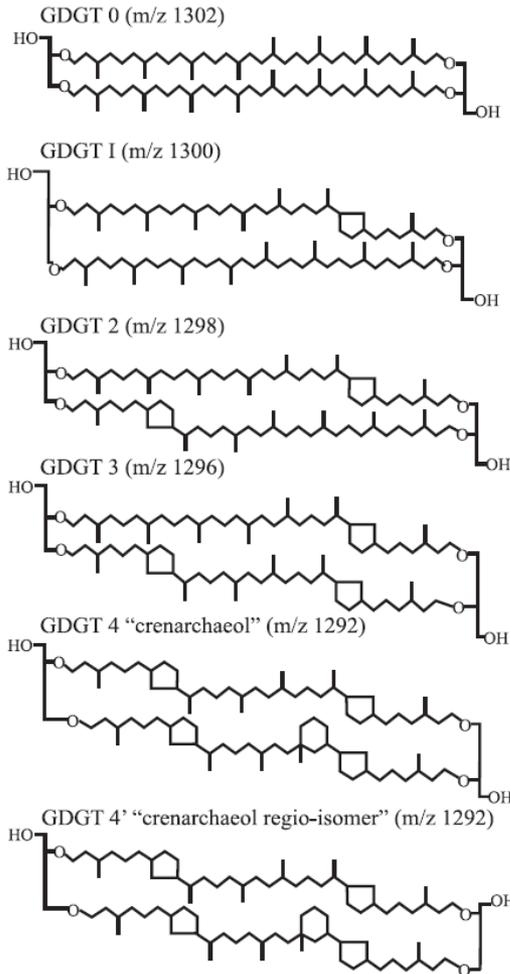
例) サンゴ・有孔虫の石灰殻
の酸素同位体比($\delta^{18}\text{O}$)・金属
元素比(Sr/Ca), バイオマー
カー温度計

地球科学(古生物学)
指標

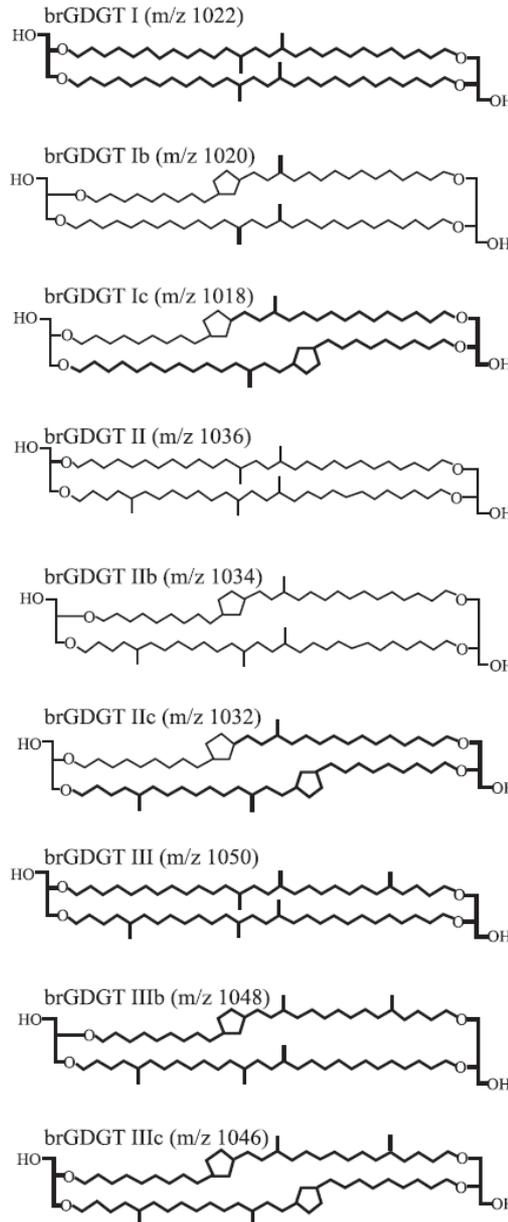


GDGT (glycerol dialkyl glycerol tetraethers) 古水温指標 (TEX₈₆)

Isoprenoidal GDGTs



Branched GDGTs



$$\text{TEX}_{86} = \frac{[\text{GDGT2} + \text{GDGT3} + \text{GDGT4}']}{[\text{GDGT1} + \text{GDGT2} + \text{GDGT3} + \text{GDGT4}']}$$

$$\text{TEX}_{86}^{\text{L}} = \log \frac{[\text{GDGT2}]}{[\text{GDGT1} + \text{GDGT2} + \text{GDGT3}]}$$

$$\text{TEX}_{86}^{\text{H}} = \log \frac{[\text{GDGT2} + \text{GDGT3} + \text{GDGT4}']}{[\text{GDGT1} + \text{GDGT2} + \text{GDGT3} + \text{GDGT4}']}$$

$$\text{MBT} = \frac{[\text{GDGT I} + \text{GDGT Ib} + \text{GDGT Ic}]}{[\sum \text{all branched GDGTs}]}$$

$$\text{CBT} = \frac{[\text{GDGT Ib} = \text{GDGT IIb}]}{[\text{GDGT I} + \text{GDGT II}]}$$

・古細菌由来のGDGT
 イソプレノイドタイプ - 海洋
 分枝鎖(branched)タイプ
 - 陸上土壌

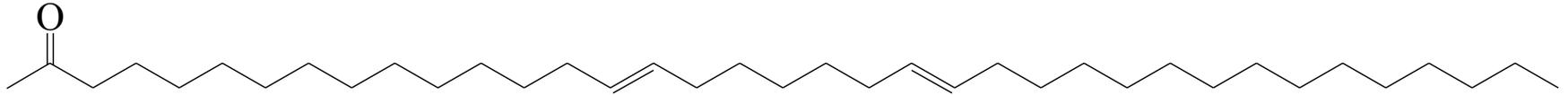
・古細菌は海洋表層から中層まで分布？

Schouten et al. (2011)
 Quat. Sci. Rev.

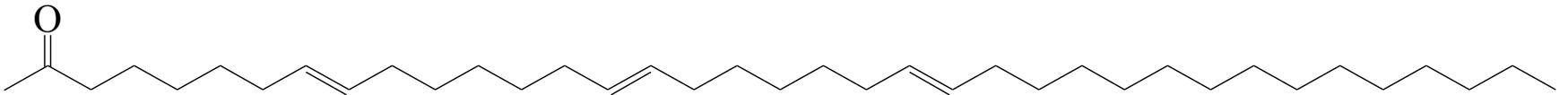


2. ALKENONE THERMOMETRY

Alkenone



C37:2

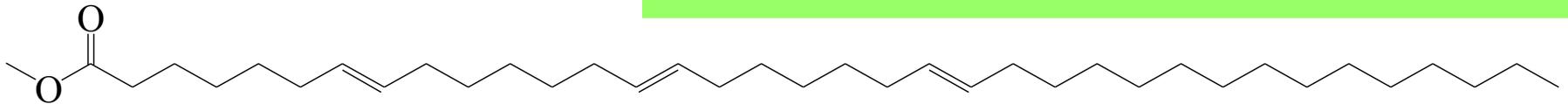


C37:3

$$U^k_{37} = ([37:2] - [37:4]) / ([37:2] + [37:3] + [37:4])$$

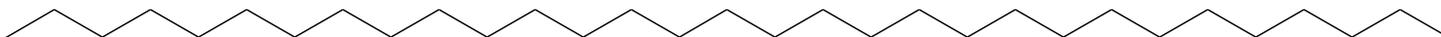
$$U^k'_{37} = [37:2] / ([37:2] + [37:3]).$$

Alkenoate



C37:3(C36:3FAME)

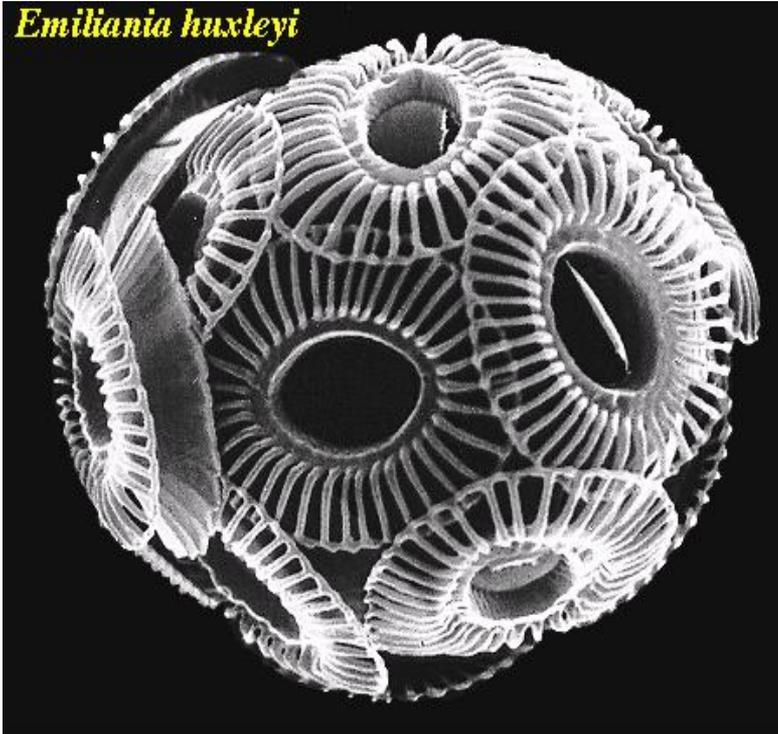
Alkane



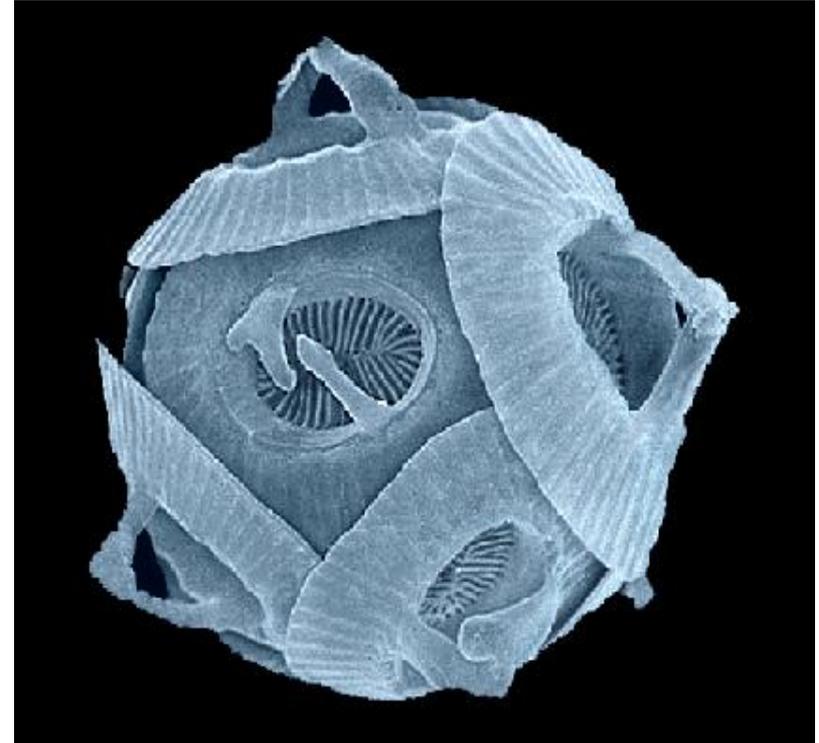
C31

SOURCE ORGANISMS IN MARINE ENVIRONMENT

Emiliana huxleyi



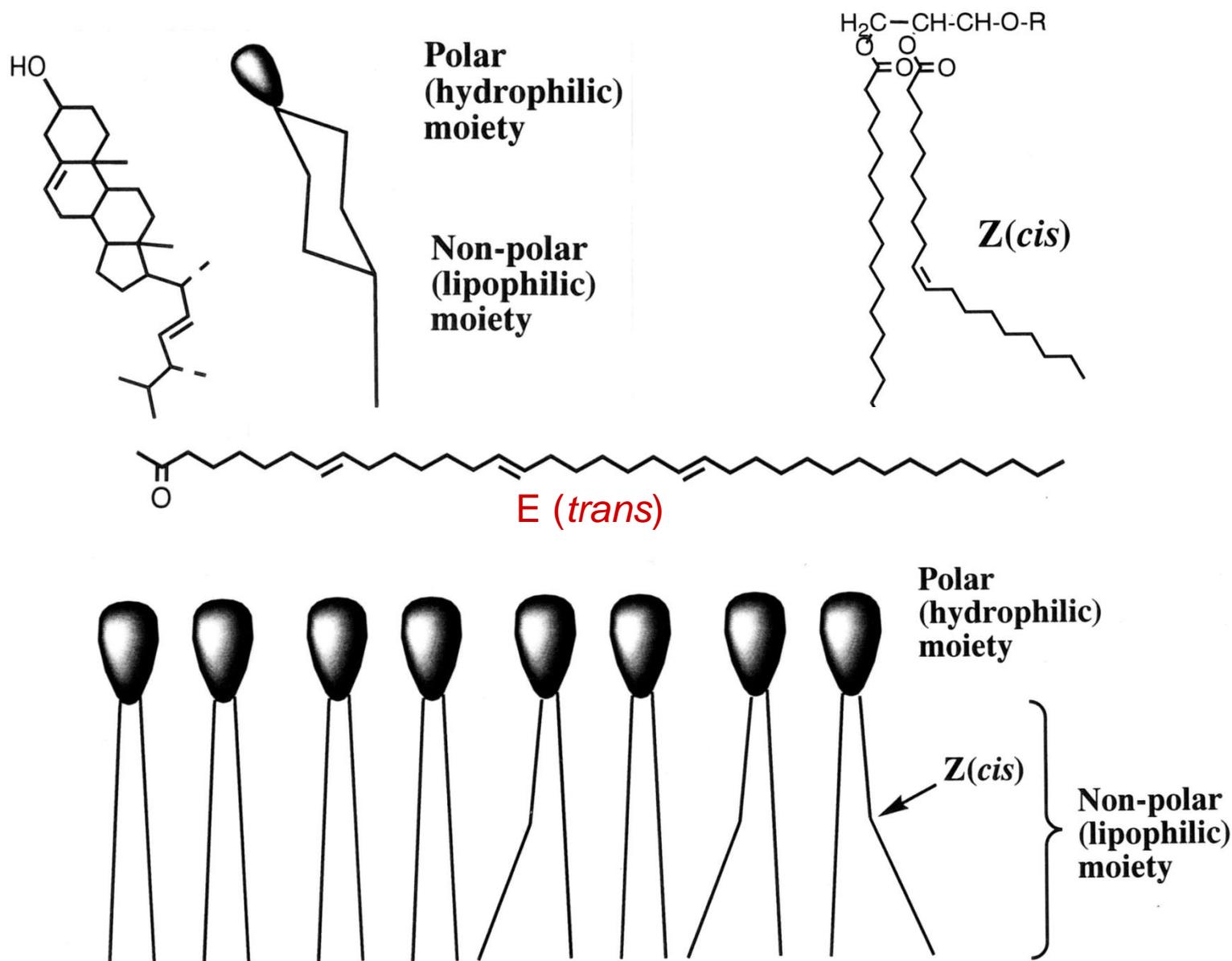
Emiliana huxleyi



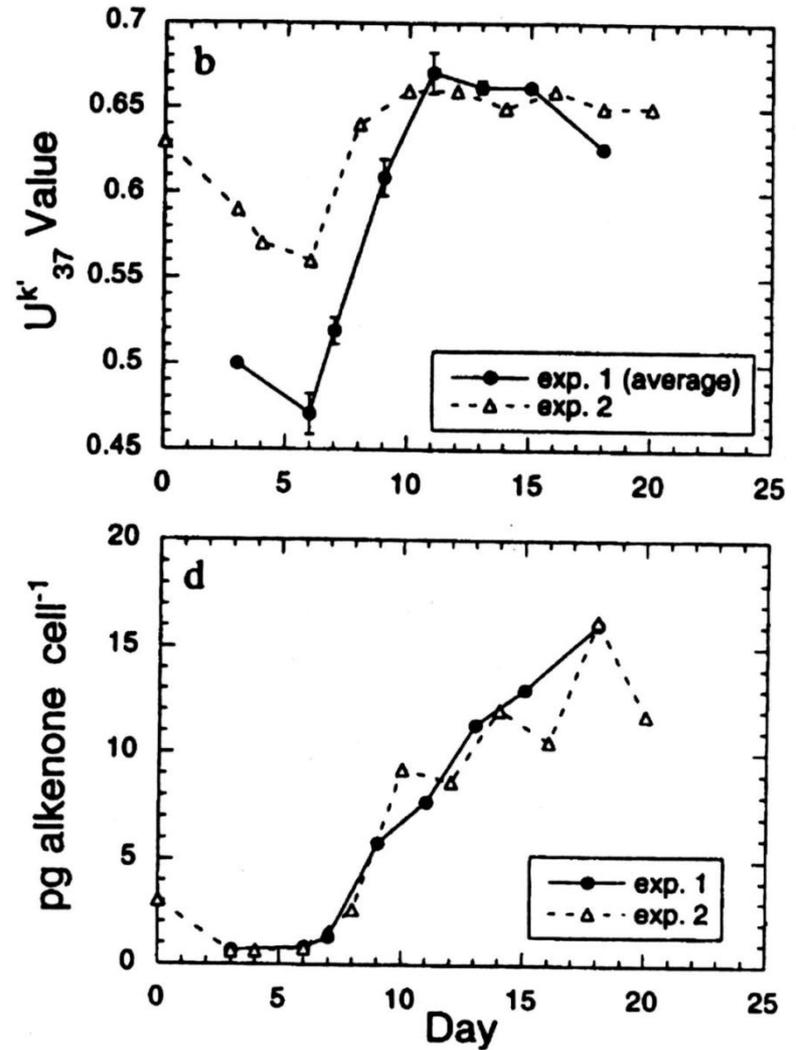
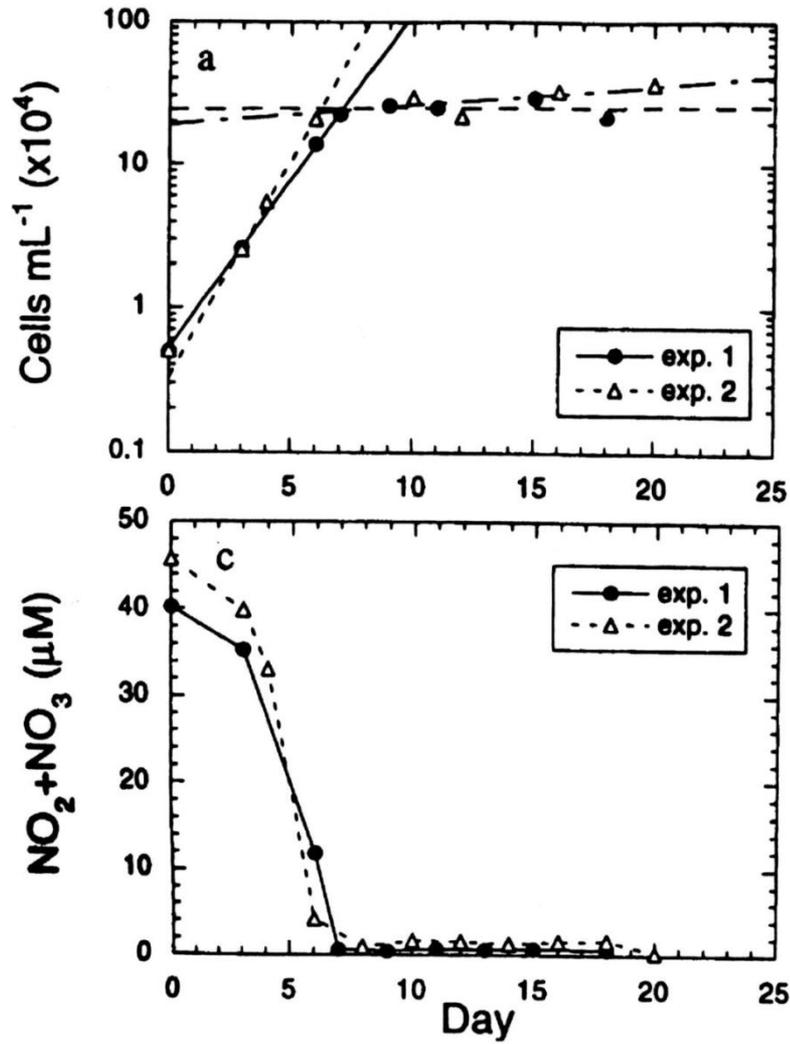
Gephyrocapsa oceanica

Marine phytoplankton (microalgae)
Haptophyceae (Coccolithophorid)

WHY DOES THE ALKENONE UNSATURATION RATIO CHANGE DEPENDING ON GROWTH TEMPERATURE?



FUNCTION OF ALKENONE – STORAGE LIPIDS?



Epstein et al. (1998) PO

INTERCELLULAR LOCALIZATION OF ALKENONES

(SAWADA AND SHIRAIWA, 2004)

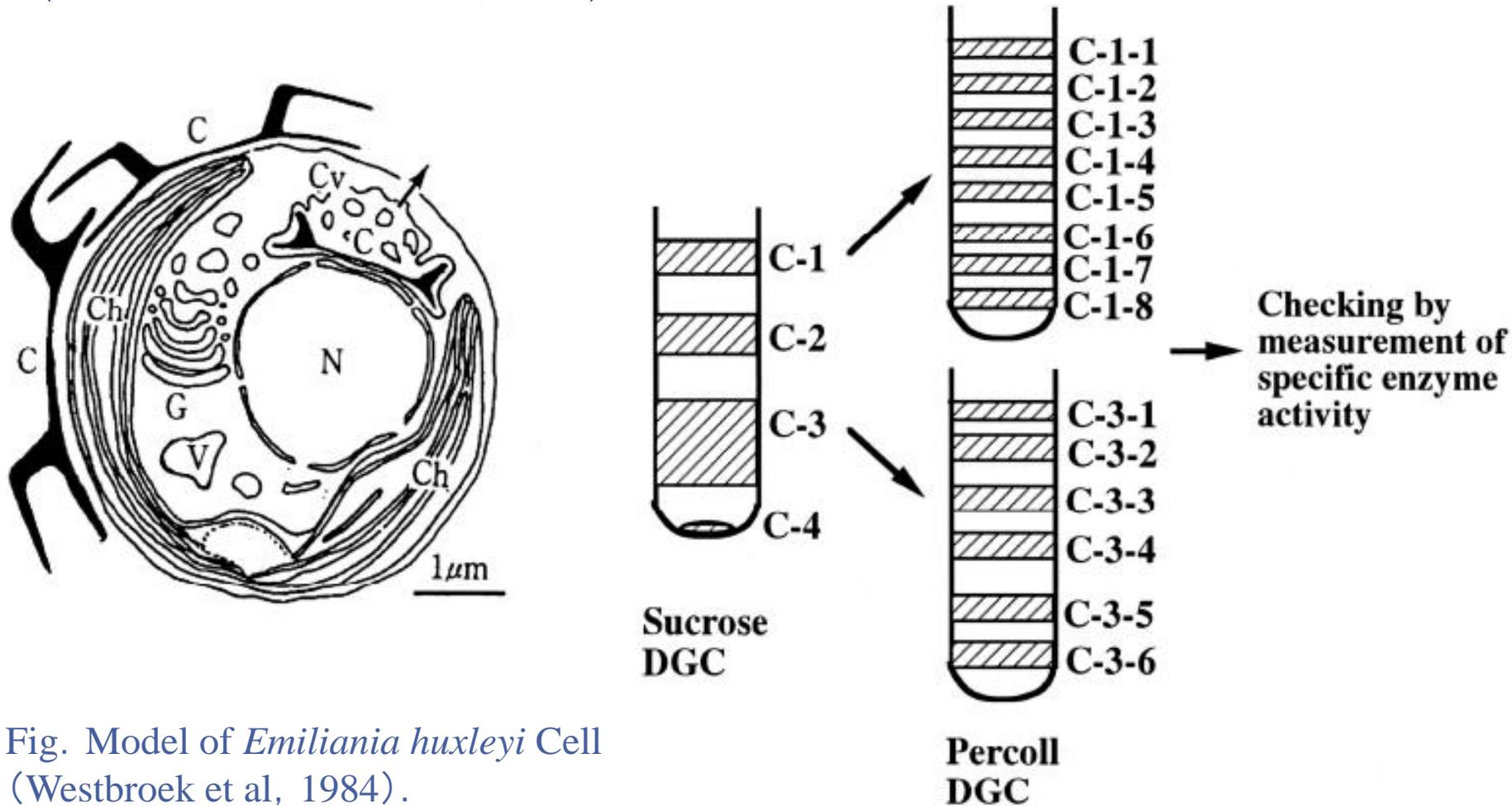
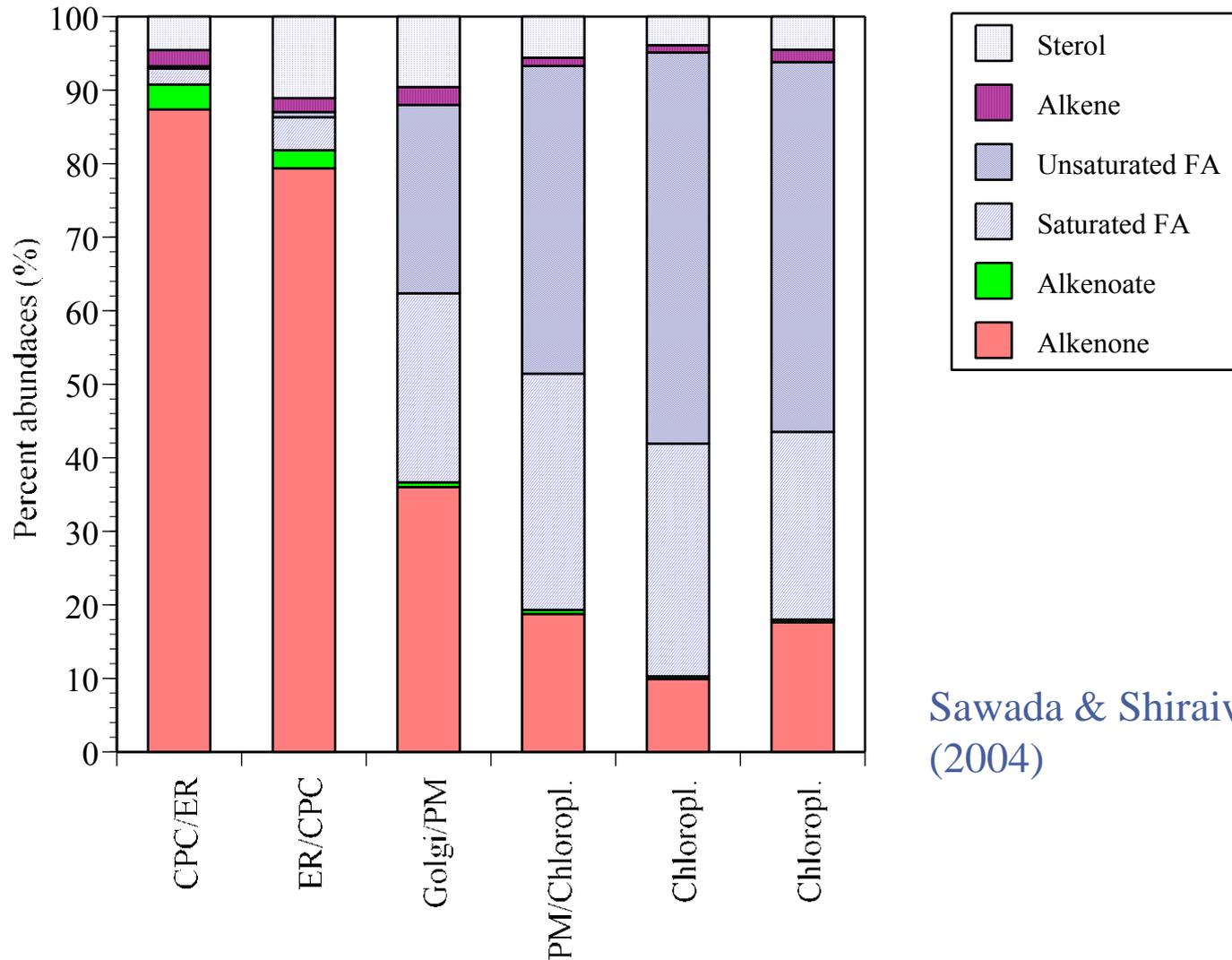


Fig. Model of *Emiliana huxleyi* Cell
(Westbroek et al, 1984).

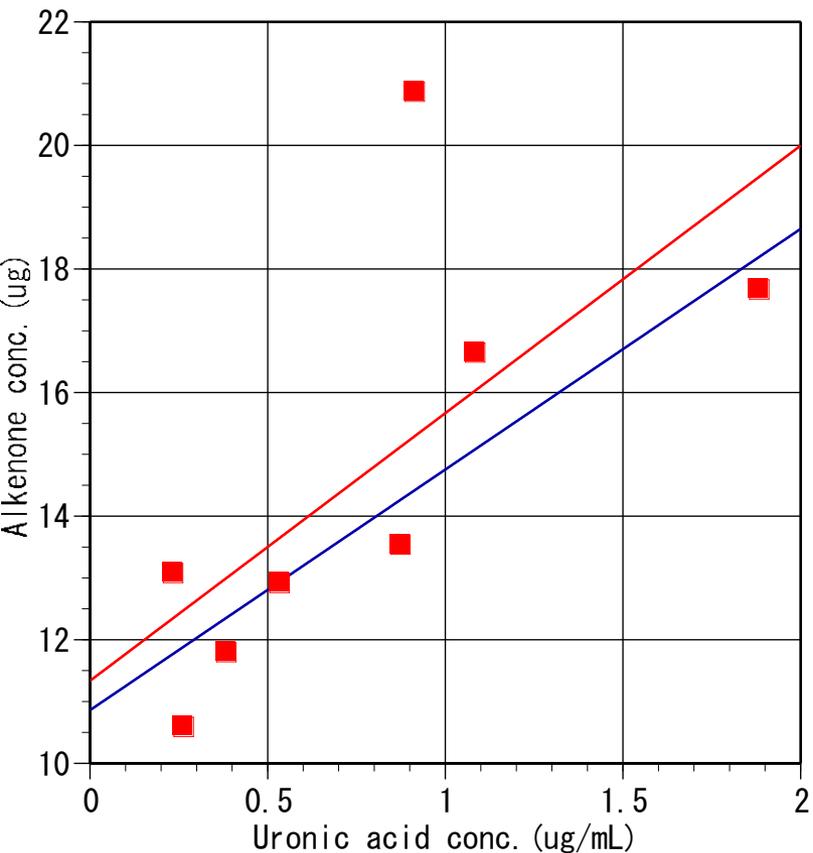
- C: Coccolith, Ch: Chloroplast (thylakoid), Cv: Coccolithvacuole, G: Golgi body, N: nucleus, V: Vacuole

LIPID COMPOSITIONS OF ORGANELLE FRACTIONS

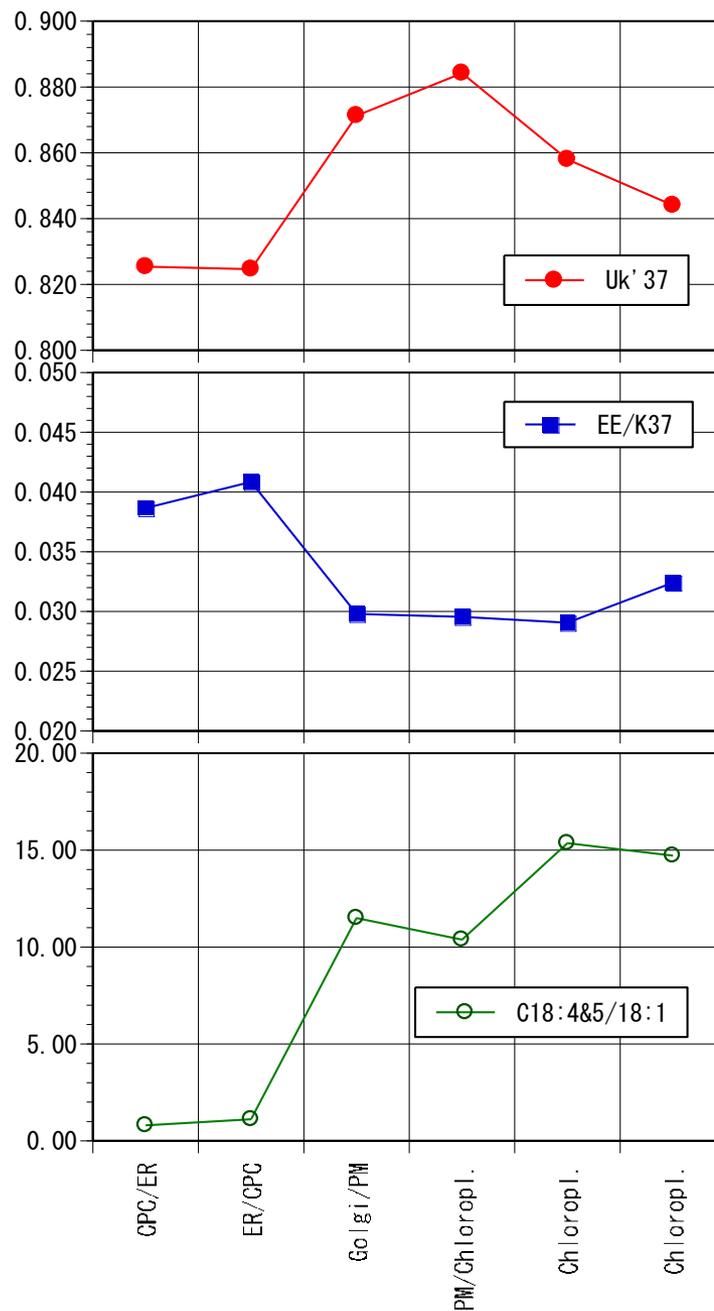


Sawada & Shiraiwa
(2004)

Alkenones vs. Uronic acids



Sawada & Shiraiwa
(2004)



Uk'37

EE/K37

FA
18:4&5
/18:1



STAINING WITH THE
FLUORESCENT
LIPOPHILIC DYE NILE
RED (ELTGROTH ET
AL.2005)

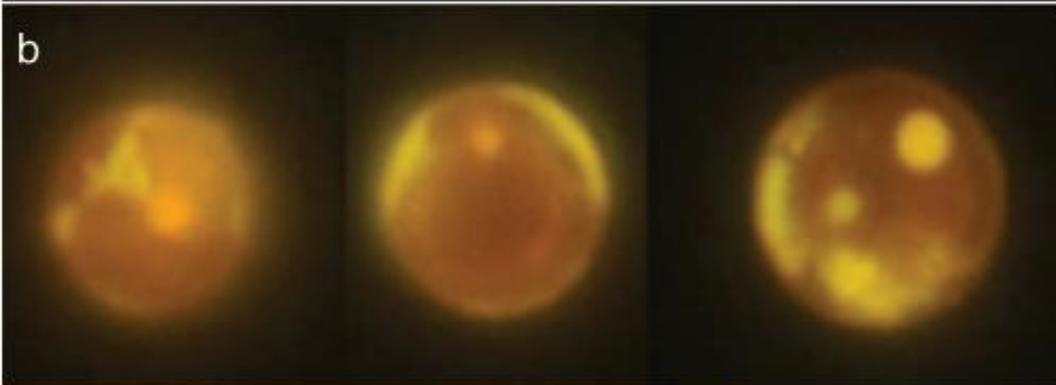
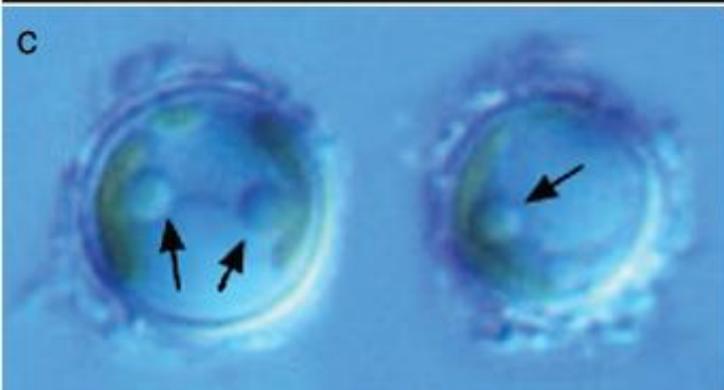


Fig. Light micrographs of lipid bodies. (a, b)
NR-stained epifluorescence.

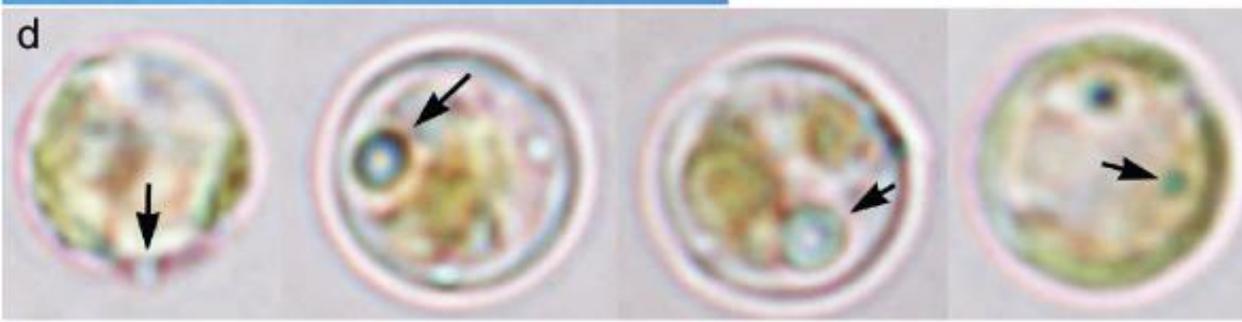
(a) *Isochrysis galbana* without emission
bandpass filter. Neutral lipid appears yellow,
polar lipids and chl, red.

(b) *Emiliana huxleyi* 1742 with emission filter
to remove red fluorescence.



(c) Nomarski DIC images of *E. huxleyi* 1516.
Ragged coccosphere is visible on cell exterior.
Spherical lipid vesicles (arrows) are seen
associated with chloroplasts.

(d) Bright-field image of *E. huxleyi* 1742. Note
blue coloration of LBs (arrows).



INTRACELLULAR LOCALIZATION (AND FUNCTION) OF ALKENONES

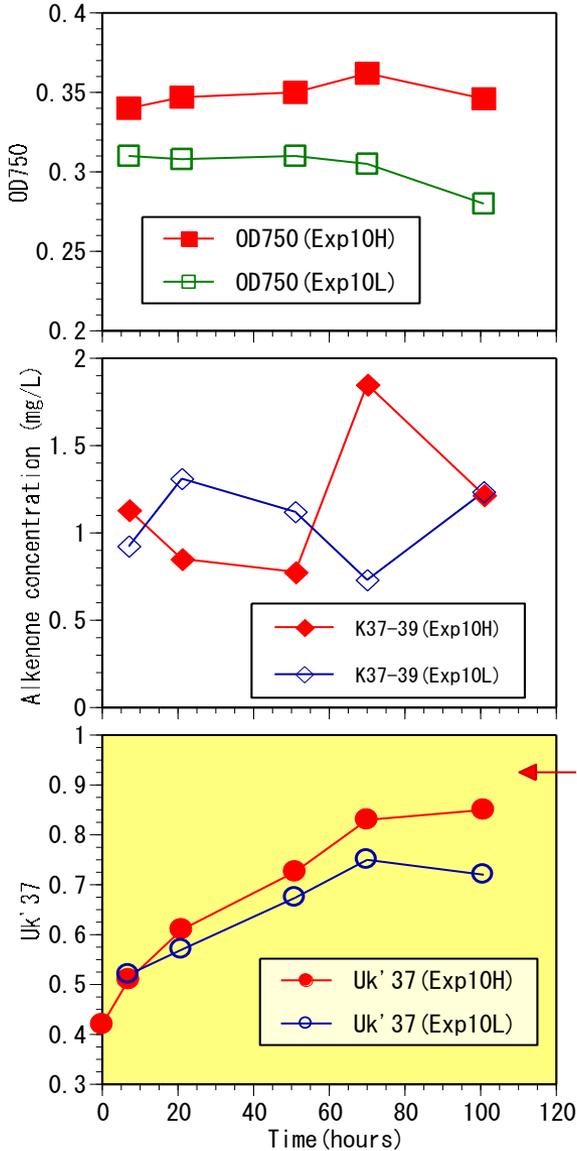
- Sawada & Shiraiwa, 2004
- ER and CPC
- Membrane unbound lipid (micelle)
- Linked to calcification
- Storage lipid
- Eltgroth et al., 2005
- Chloroplast
- Lipid body (Lipid droplet)
- Not linked to calcification
- Storage lipid



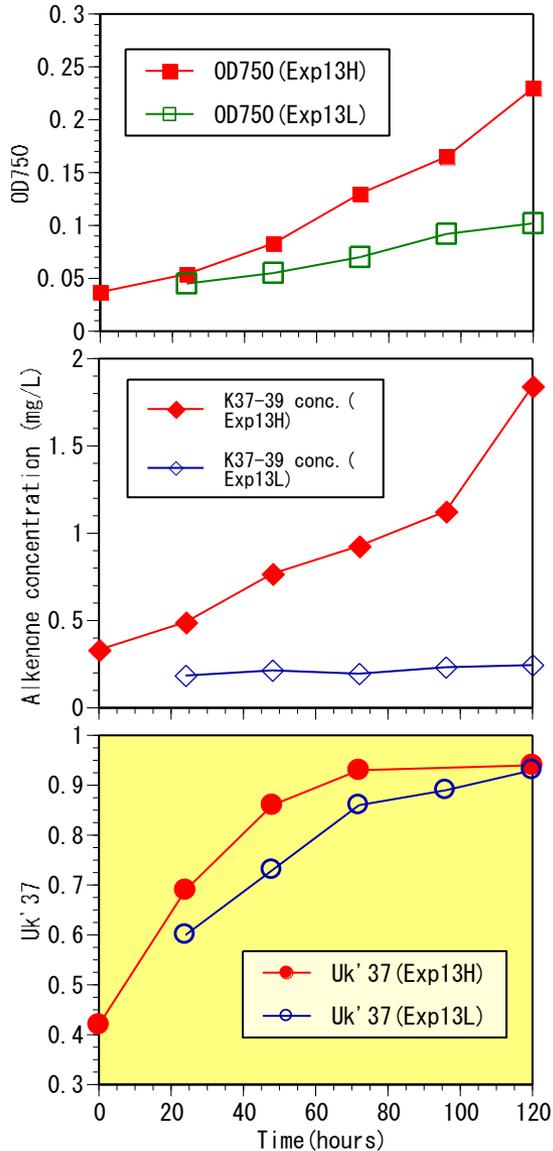
高温順化実験 (20°C → 25°C)

H: 20000lux, L: 2000lux

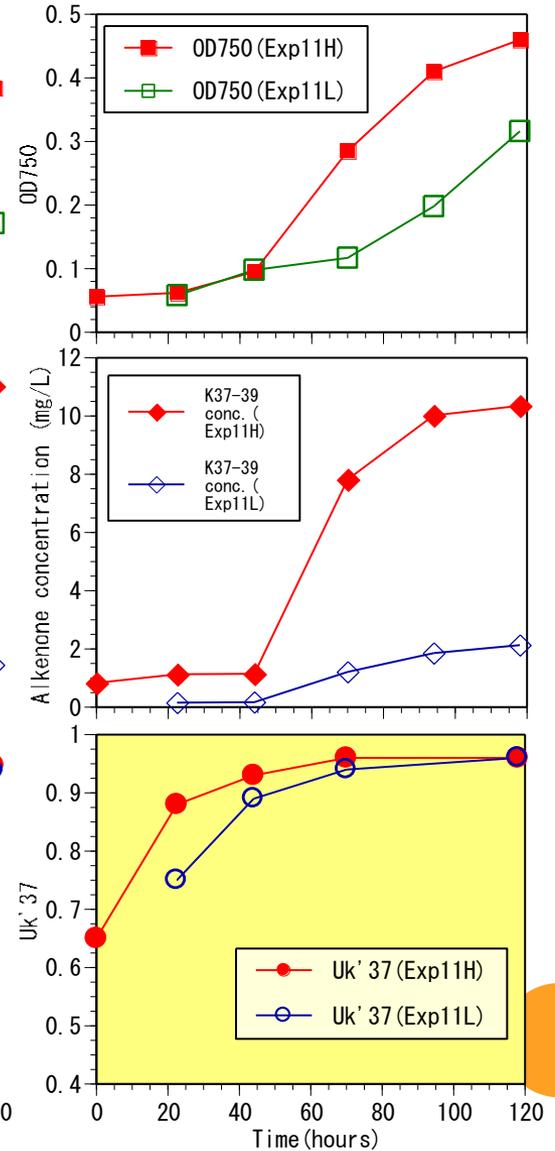
Experiment T1
E. huxleyi (EH2) 20→25C



Experiment T2
E. huxleyi (EH2) 20→25C



Experiment T3
G. oceanica (GO1) 20→25C



(Sawada et al., unpublished.)

JAXA/宇宙フォーラム

宇宙環境利用に関する地上研究の公募 2008-2009

研究班WG名称

無重力環境に対する微細藻類の応答機構

研究代表名: 白岩 善博(筑波大学大学院生命環境科学研究科)

研究分担者名:

都筑 幹夫(東京薬科大学生命科学部)

沢田 健(北海道大学大学院理学研究院)

鈴木 石根(筑波大学大学院生命環境科学研究科)

ハプト藻(円石藻)の浮力機能に関する脂質の役割？

- アルケノンが浮力を与える？
- Fernandez et al.(1994). Mar. Ecol. Prog. Ser. *Emiliana huxleyi* のメソコズム実験
- Bell and Pond (1996) Phytochemistry
Emiliana huxleyi - 石灰化と非石灰化細胞で比較



温度順化実験からの解釈

- 温度順化実験において、5°Cの温度の上昇（下降）に対してアルケノン不飽和度が完全に順化するまでに72~120時間（3~5日）と長時間必要とすることがわかった。

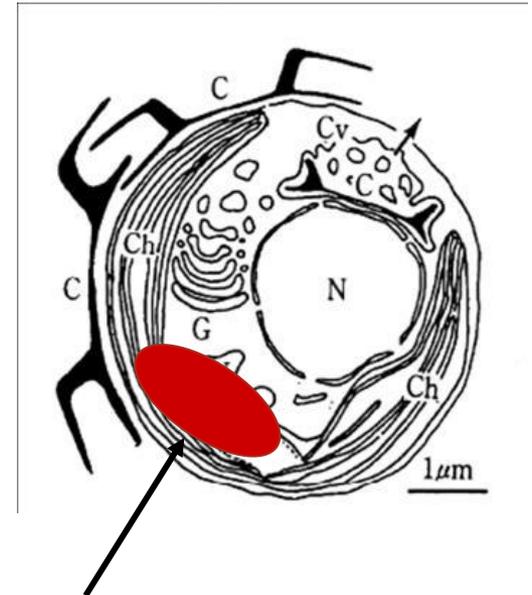
->順化過程で、desaturaseのような酵素による脱水素反応による二重結合の生成ではなく、不飽和化合物の合成

- ・ 強光度条件で、成長速度の大きい条件での温度順化におけるアルケノン不飽和度の順化速度は、明らかに弱光度下でのそれよりも大きいことがわかった。このことから不飽和度の順化速度は光強度と成長速度に応じて大きくなることが示された。

・ 実験T1のようなほとんど細胞が成長しない場合には不飽和度が順化に達しない

->アルケノン不飽和化は成長速度に大きく影響される

アルケノン不飽和比の温度相関性のメカニズムの仮説:

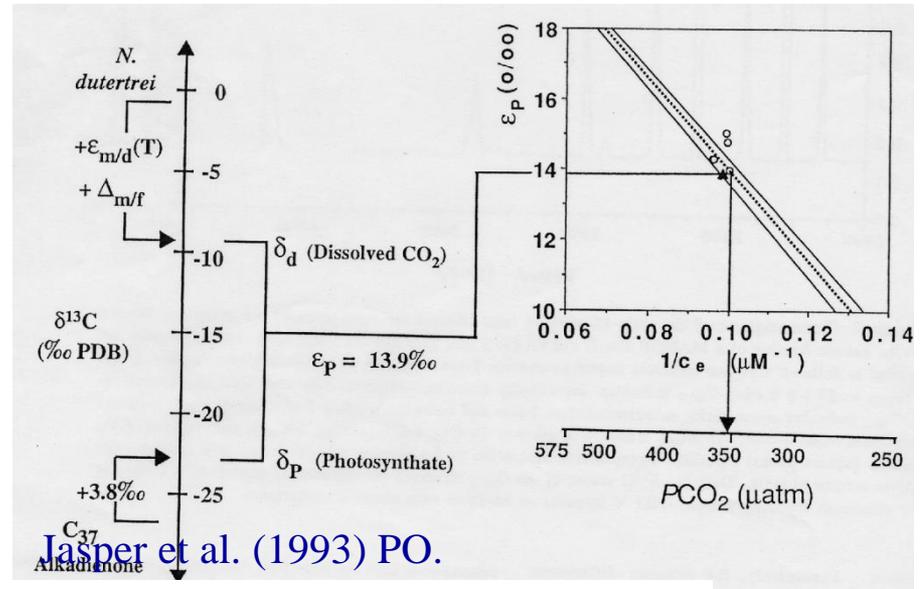


アルケノンとその派生物のdroplet

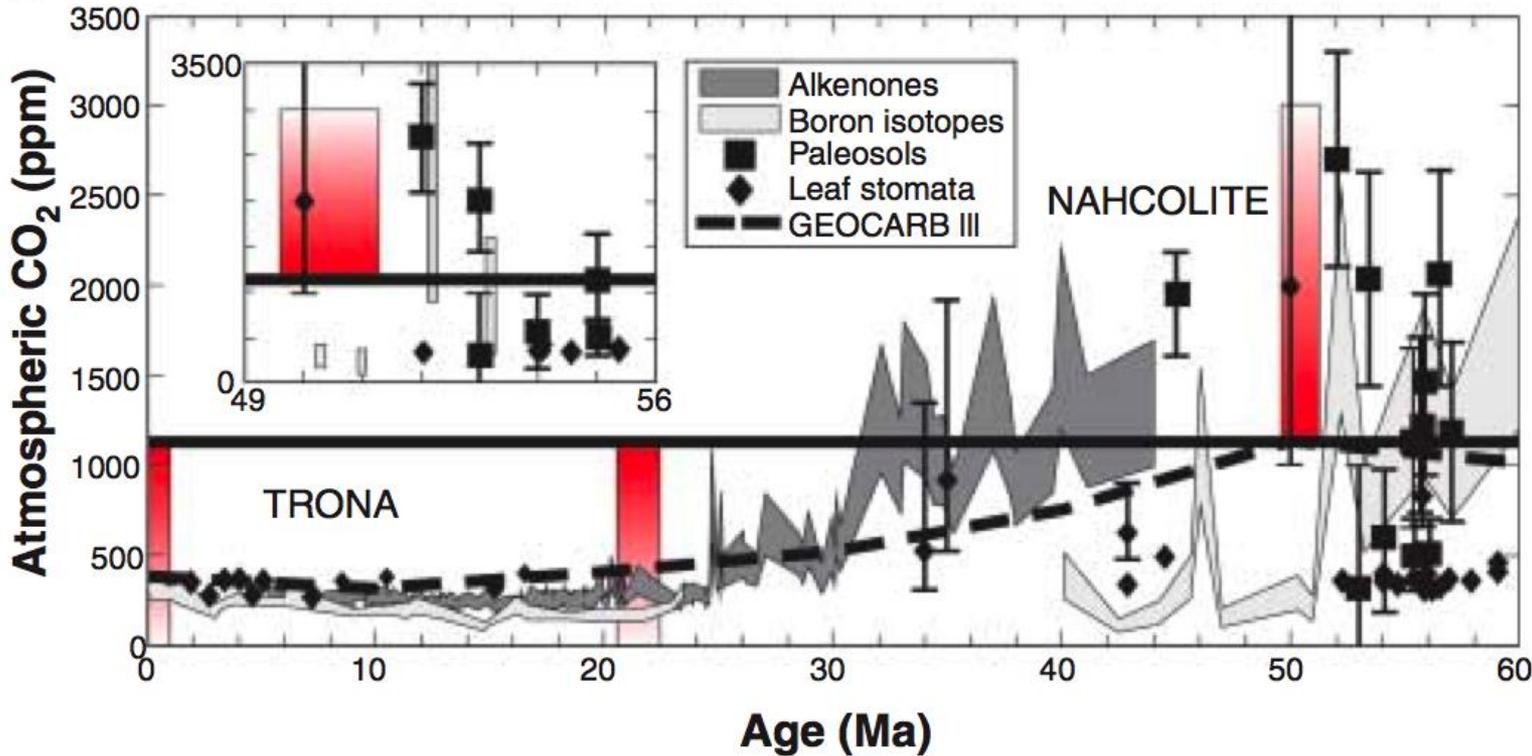
- ・ 2不飽和, 3不飽和化合物の融点
が異なる。→研究例なし。
- ・ 生育温度によって2不飽和, 3不飽
和化合物の割合を変えて, 液体状
態を維持する。
- ・ 貯蔵性脂質として利用し易くしてい
る。

Paleo-barometry by carbon isotope ratios of alkenones

ϵ_p : CARBON ISOTOPE FRACTIONATION DURING PHOTOSYNTHESIS



B



Variations of atmospheric CO_2 concentrations reconstructed by foraminiferal $\delta^{11}B$ and alkenone ϵ_p , ST index (Lowenstein & Demicco, 2006, Science)

参考文献1

- 田近英一, 2004: 地球環境の安定性とスノーボールアース・イベント, 「NHK地球大進化 46億年・人類への旅 2 全球凍結」(NHK「地球大進化」プロジェクト編), NHK出版, pp.139
- A. Ridgwell, 2005: :A Mid Mesozoic Revolution in the regulation of ocean chemistry, *Marine Geology* , 217, 339–357
- J. C. Zachos, S. Schouten, S. Bohaty, T. Quattlebaum, A. Sluijs, H. Brinkhuis, S. J. Gibbs, T. J. Bralower, 2006: Extreme warming of mid-latitude coastal ocean during the Paleocene–Eocene Thermal Maximum: Inferences from TEX 86 and isotope data., *Geology*, 34, 737–740
- S. Epstein, and T. Mayeda, 1953: Variation of O18 content of waters from natural sources, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4, 213–224
- コップ, カーシュビング, 2004: 地球大進化, NHK出版
- J. F. Kasting, M. T. Howard, 2006: Atmospheric Composition and Climate on the Early Earth, *Philosophical Transactions A*, 361, 1733–1742
- J. L. Kirschvink, 1992: Late Proterozoic Low-Latitude Global Glaciation: The Snowball Earth, Cambridge University Press, 51–52
- P. F. Hoffman, A. J. Kaufman, G. P. Halverson, D. P. Schrag, 1998: A Neoproterozoic 'snowball Earth' simulation with a coupled climate/ice-sheet model, *Nature*, 405, 425–429
- G. E. Williams, 1993: History of the Earth's obliquity. *Earth–Science Reviews*, 34, 1–45.

参考文献2

- 川上紳一監修、渡会圭子訳, 2004: スノーボール・アース - 生命大進化をもたらした全地球凍結, 早川書房
- P. R. Epstein,, H.F. Diaz, S. Elias, G. Grabherr, N.E. Graham, W.J.M. Martens, 1998: Biological and physical signs of climate change: Focus on mosquito-borne disease. Bull. Am. Meteorol. Soc., 78, 409-417,
- Westbroek P., De Jong E. W., Van der Wal P., Borman A. H., De Vrind J. P. M., Kok D., De Bruijin W. C., Parker, S. B. 1984 :Mechanism of calcification in the marine alga *Emiliana huxleyi*. Philos. T. Roc. Soc. London , 304, 435-444,.
- Sawada K., and Shiraiwa Y., 2004 :Alkenone and alkenoic acid compositions of the membrane fractions of *Emiliana huxleyi*. Phytochemistry, 65, 1299-1307.
- Eltgroth M.L., Watwood R.L., Wolfe G.V., 2005: Production and cellular localization of neutral long-chain lipids in the haptophyte algae *Isochrysis galbana* and *Emiliana huxleyi*. Journal of Psychology, 41, 1000-1009
- Bell, M.V., Pond, D., 1996:Lipid composition during growth of motile and coccolith forms of *Emiliana huxleyi*. Phytochemistry, 41, 465-471
- Jasper J. P., G. Robert B. 1993:The relationship between sedimentary organic carbon isotopic composition and organic biomarker compound concentration, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57, 167-186
- Tim K. Lowenstein, Robert V. 2006:Demicco, Elevated Eocene Atmospheric CO₂ and Its Subsequent Decline, *Science*, 313, 1928