

地球表層の温度変動と生命の 適応進化

北海道大学大学院理学研究院
自然史科学部門
地球惑星システム科学分野
沢田 健

講演内容:

○ I. 有機・生物地球化学と生命の起源・初期生命の研究

- ・地球化学アプローチによる生命の起源の研究
- ・分子化石による初期生命の研究

○ II. 分子化石の生物地球化学の研究史

- ・アーキア、バクテリアバイオマーカー
- ・光合成生物のバイオマーカー

○ III. 地球表層(大気)の温度変動

- ・始生代・原生代の気温変動
- ・全球凍結(Snowball Earth)

○ IV. 生命の温度適応と古温度計(paleothermometry)

- ・膜脂質による温度変化への応答
- ・耐凍性
- ・アルケノン不飽和比の温度相関性の謎

○ V. 古温度計による太古の地球の古気候変動の復元

- ・アルケノン古水温計
- ・GDGT古水温計
- ・新しい古水温計の開発





理学研究科公開シンポジウム
サイエンスビジョン-最新研究から探る未来進路

2003年1月10日 10:00-15:30

北海道大学大学院理学研究科低層棟大講義室

<http://www.sci.hokudai.ac.jp/sympo.htm>

若手研究者による4講演が行われました。
107名の方々が参加されました。
(理学97名、他部局4名、一般3名・高校生3名)

研究科長



倉本氏



実験動作をスクリーンに映写

沢田氏



⇐実験室と講演会場をブロードバンドで結び、ライブ中継による講演も行われました。(協力：倉本氏)

信定氏



会場映像を実験室へ送信



出村氏

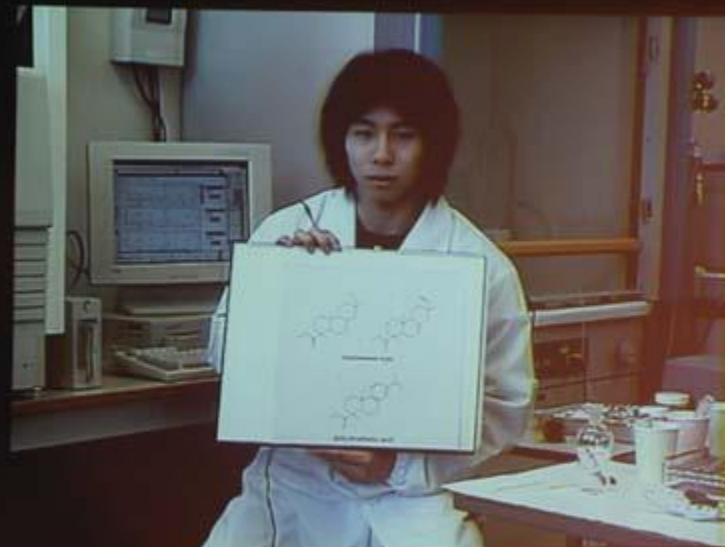


ラボ中継講演: 2003年1月10日「理学サイエンスビジョン」11:25-11:40

「植物化石中のジオポリマーの検出・同定とそのCHEMOTAXONOMIC MARKERへの応用」

～植物化石試料からの化石ポリマーの抽出処理・精製・同定(GC/MS)・定量(GC-FID)





REDFIELD RATIO レッドフィールド比 (RKR MODEL)

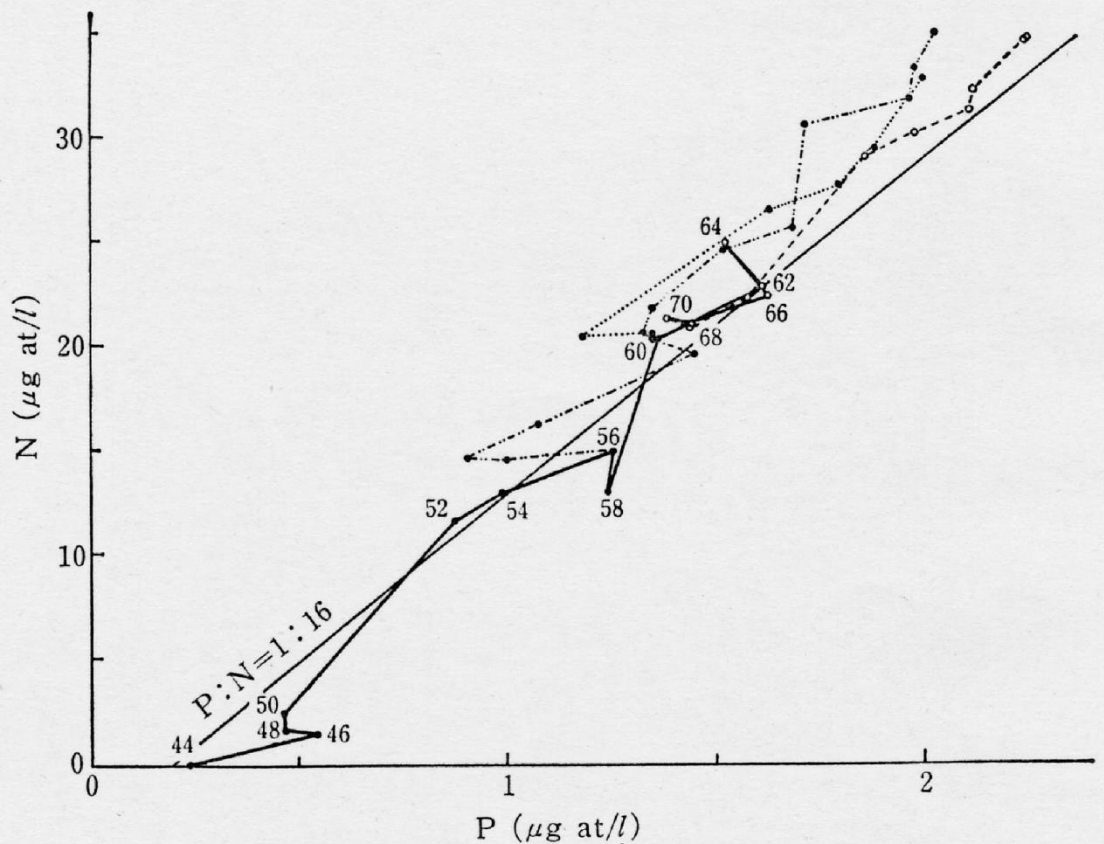
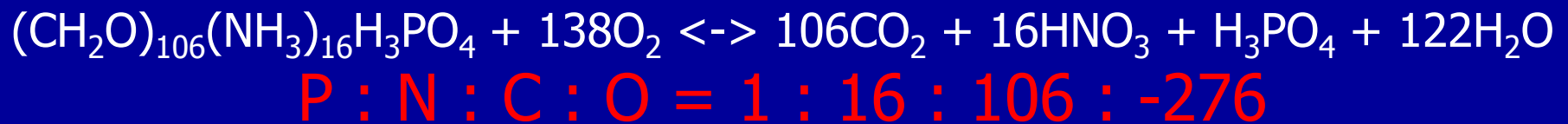


Fig. Relationship between nitrate and phosphate in South Pacific Ocean. (Tsunogai & Noriki, 1983Textbook)

- 生体ごとの元素費は異なるが、海洋(海域)では平均値は変化がほとんどない
- 有機化<->無機化 その組成比で海水から化学成分が引き出される、分解はその比で海水成分濃度を増やす。
- O₂量を調べると、各成分の変化量の絶対値を見積もれる。また、その他の元素もNやPとの比がわかると分布や動きを見積もることができる。
- ->Redfield ratioという。
- N/P=16, C/P=106 -> 下の式で有機化・無機化を表現できる。
- O₂は、1個のCの分解に2個、Nの分解に4個使われる。 ->
 $106 \times 2 + 16 \times 4 = 276$



I. 有機・生物地球化学と生命の起源・初期生命の研究

- 始生代Achean (～2.5Ga) の岩石が分布する地域

- 西オーストラリア (3.5Ga)

ノースポール: チャート-ストロマトライト様の層構造

チャート中からシアノバクテリアらしき化石発見

- グリーンランド (3.8～3.7Ga)

Isua イスア: BIF から細胞様構造体発見 -> 2次的に生じた流体包有物

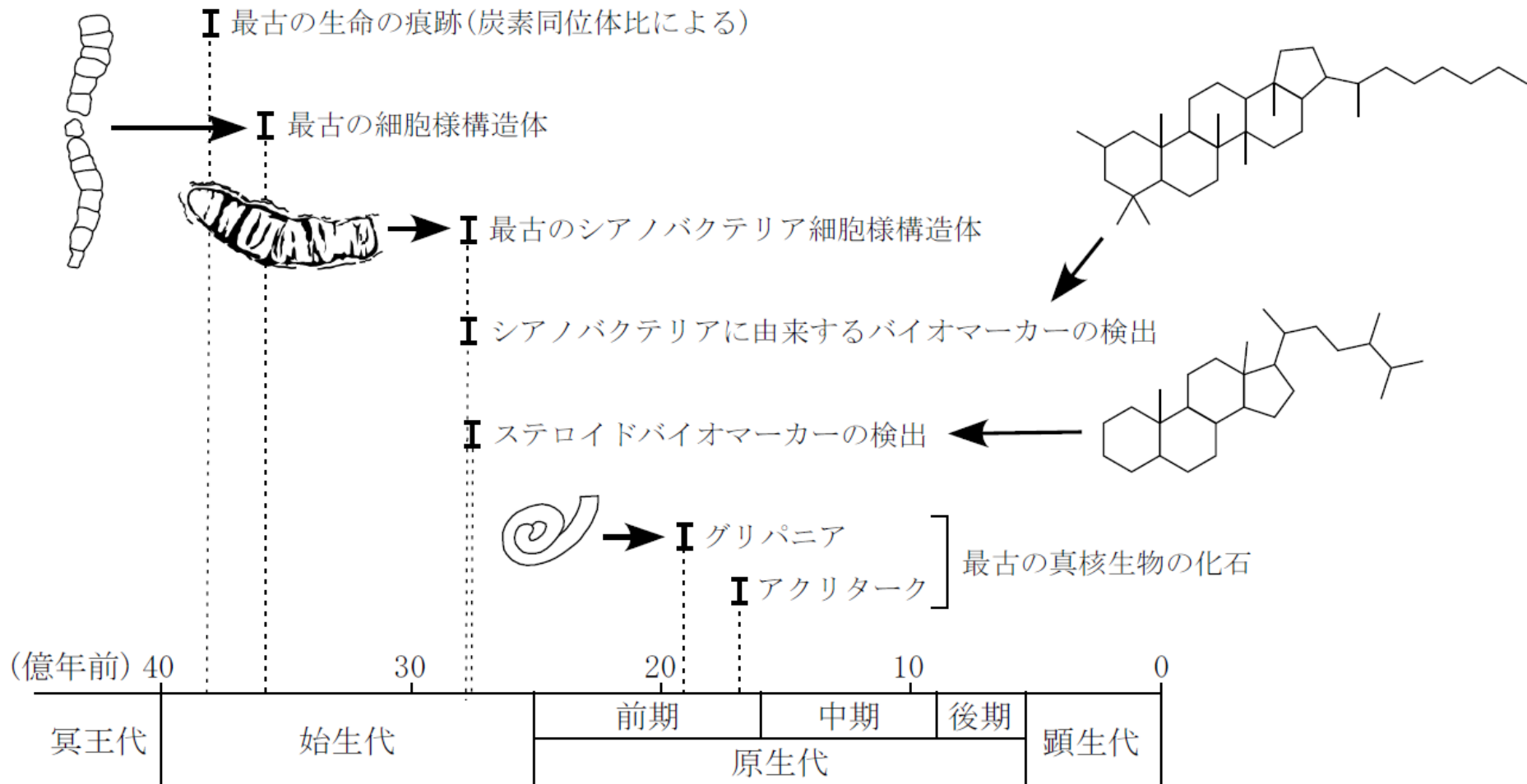
$\delta^{13}\text{C}$ 研究 - メタン酸化細菌 (バクテリア?), 光合成プランクトンの証拠

- 南アフリカ (3.4Ga)

バーバートン (Barberton) 山地 Kaapvaal Craton

Swaziland 超層群の Fig Tree 層群の BIF からシアノバクテリア様の微小構造体

生命の起源, 初期生命の研究



生命の起源および生物進化の主な出来事の地質年代(堀口健雄, 2008)。化石(Schopf, 1993, Han and Runneger, 1992, Knoll, 1994)またはバイオマーカー(Brocks et al.1999)の証拠に基づく。

炭素同位体比による生命の起源の研究

炭素固定(カルビン・ベンソン回路)の開始

→大きな負の同位体シフト($\delta^{13}\text{C} \approx -20\text{‰}$)

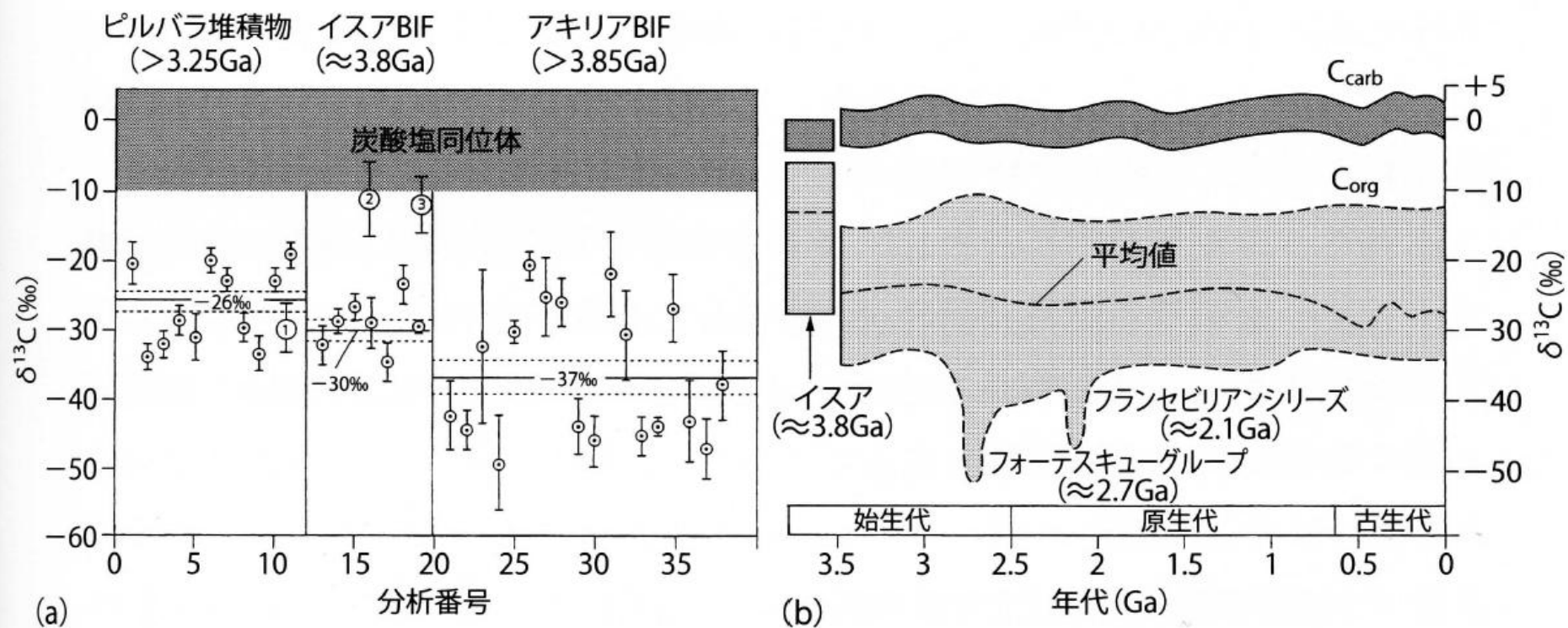
Schidlowski(1988): -26‰ (35億年前, Godthåbsfjord, Greenland)

Mojzsis(1996): $-50 \sim -20\text{‰}$ (38.5億年前, Akilia Island, West Greenland)
→縞状鉄鉱層アパタイト中のグラファイト

Rosing(1999): -19‰ (> 37 億年前, Isua Greenstone Belt, West Greenland)
→タービダイト性(海洋性)変成堆積岩中のグラファイト



炭素同位体比による生命の起源の研究



38億年間の溶存無機炭素と有機物中の炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 値(川幡穂高, 2011)。Mojzsis et al. (1996), Buick (2003)に基づく。

堆積物質の炭素安定同位体比($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$)の原理

$$^{12}\text{C} : ^{13}\text{C} : ^{14}\text{C} = 0.99 : 0.01 : 1.2 \times 10^{-12}$$

- Mass spectrometry 質量分析法 <- Urey・McKinney Method
- 国際標準(Standard): PDB (Pee Dee Belemnite)

<炭酸塩>

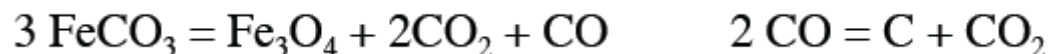
- 海水の炭素同位体比と同じ
- 海洋表層での有機炭素・無機炭素の同位体マスバランス
- 温度(海水温)
- メタンなど ^{12}C に富む気体の循環

<有機物>

- 起源となる有機物の同位体比
<- 光合成, バクテリアなど
- 堆積後の続成作用
初期: 脱 CO_2 -> $\delta^{13}\text{C}$ 軽くなる
後期: 脱 CH_4 , cracking -> $\delta^{13}\text{C}$ 重くなる

Schidlowski(1988)→Mojzsis(1996)で流体の流れた跡であると指摘.

Mojzsis(1996)→Van Zuilen et al. (2003)で菱鉄鉱の反応による生成物であると指摘.



300～600℃でおおよそ5～10‰の同位体分別

高度に変成を受けているため, どこでグラファイトが入ったか不明
(アパタイトの鉛 - 鉛年代は15億年前を示す)

Rosing(1999)→変成が最も小さく, 元々の堆積構造がわかりやすい.

炭酸塩脈中の炭酸塩(-2‰)やグラファイト(-11‰)よりやや軽い(-16‰).
→生体由来であること, 光合成を説明するには不十分?



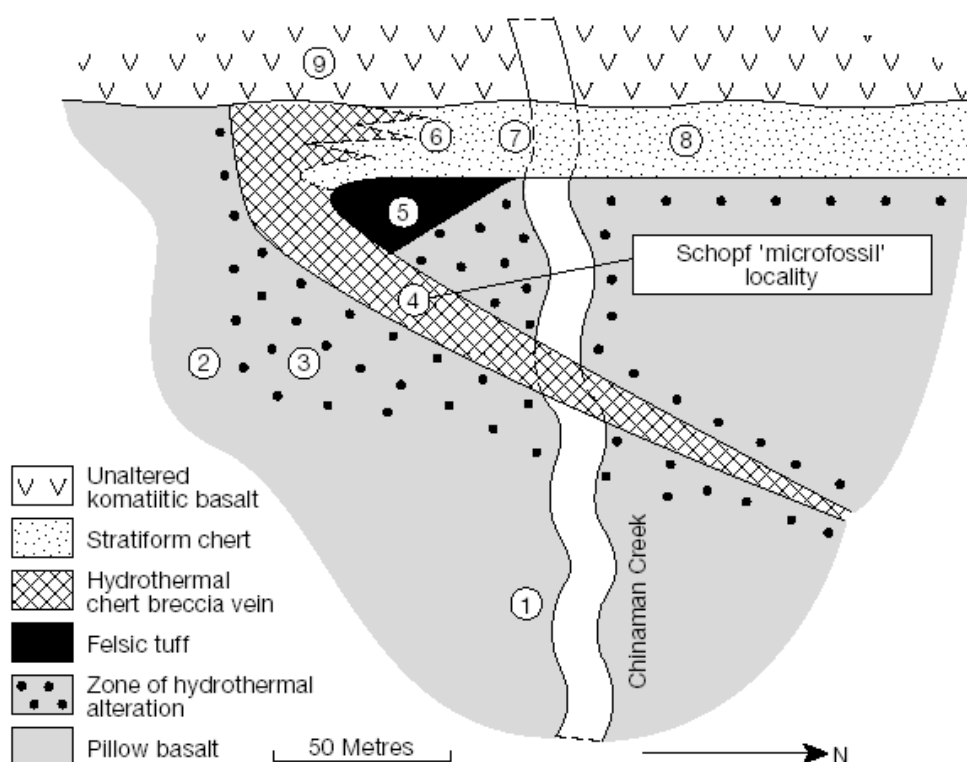
Questioning the evidence for Earth's oldest fossils

Martin D. Brasier*, Owen R. Green†, Andrew P. Jephcoat†,
Annette K. Kleppe†, Martin J. Van Kranendonk†, John F. Lindsay‡,
Andrew Steele§ & Nathalie V. Grassineau||

BRASIER ET AL. (2002)

NATURE

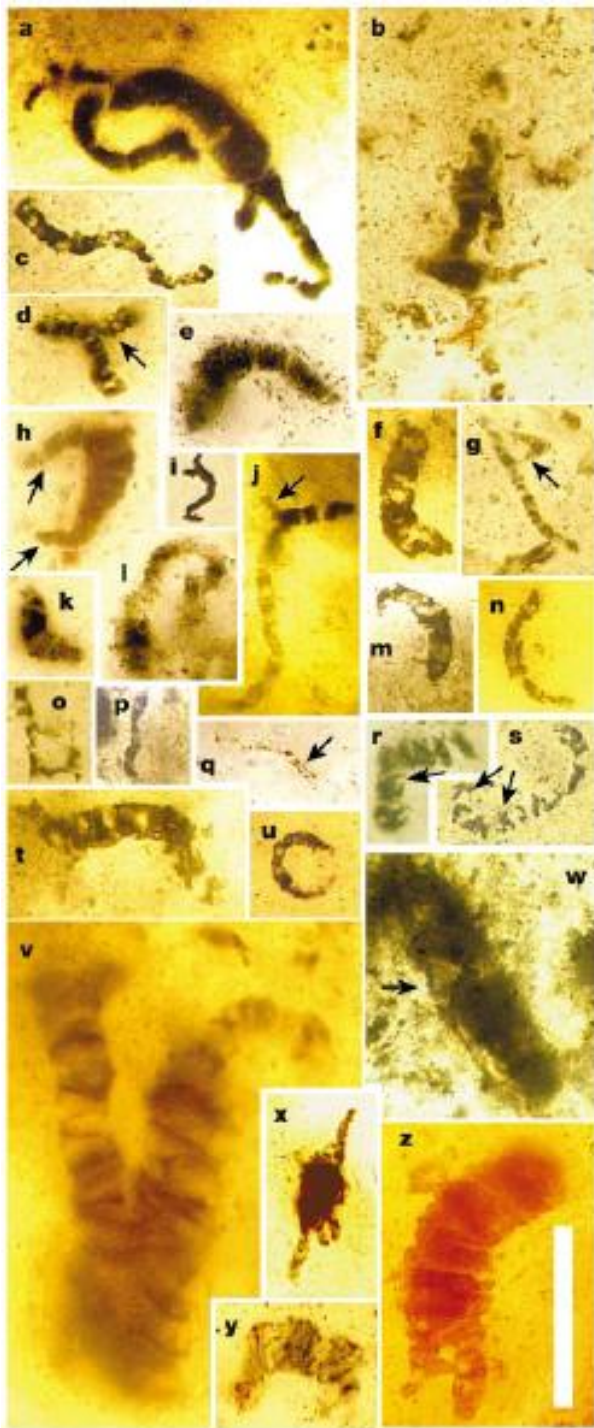
SCHOPFらの研究の否定論文



	1	2	3	4 A1/B1	4 A2/B2	4 A3/B3	4 C/A4	5	6	7	8	9
Chromite	-	-	-	●	●	●	-	●	-	-	-	-
Iron oxide	■	■	■	●	●	●	-	●	■	-	-	■
TiO ₂	■	■	-	●	■	■	-	■	-	-	■	■
BaSO ₄	-	□	-	■	■	■	■	■	■	■	■	-
Alunite-jarosite	-	-	-	■	■	■	■	-	■	■	■	-
Aluminosilicates	■	■	■	■	■	■	-	■	-	-	-	■
Metals, sulphides	Cu ■	Ni □ Cu □ Zn □ Pb □	-	Fe ● Ni ● Cu ● Zn ● Pb ●	Fe ● Ni ● Cu ● Zn ● Sn ● Pb ●	Fe ● Ni ● Cu ●	Pb □	Pb ●	Fe ● Cu ● Zn ●	Fe ● Ni, As □ Cu ● Cu □	Fe ● Cu ● Zn ● Sb ●	-
Sulphur (p.p.m.)				-	162	79			-	330	607	
Graphite				■	■	■		■	■	■	■	
Carbon (p.p.m.)				126-1206	1413	36			34	2545	2162	
δ ¹³ C _{PDB} (‰)				-30.3 -26.5	-29.9	-28.4			-25.6	-29.5	-25.6	
δ ¹⁸ O _{SMOW} (‰)				+14.5 +14.7	+14.5	+14.6 +14.7			+14.3	+14.1	+13.7	

● In shards, clasts ○ Around shards, clasts ■ In matrix □ In veins * Arsenic-rich
A-C, Fabrics recognized in thin section Open box, not analysed

APEXチャート中のシアノバクテリア様構造体



- オーストラリア西部ワラウーナ (Warrawoona) 層群Apexチャートの生命の形態学的証拠
- 金属を含む熱水鉱床噴出口ーチャートや火山ガラスで生成された非晶質グラファイトの二次生成物である。
- 有機物である→金属触媒下でのFischer-Tropsch型の有機合成で生成。
- $\delta^{13}\text{C}$ 値→ Fischer-Tropsch反応における炭素同位体分別(?)
- 最古の海底熱水系の証拠

Brasier et al.(2003)

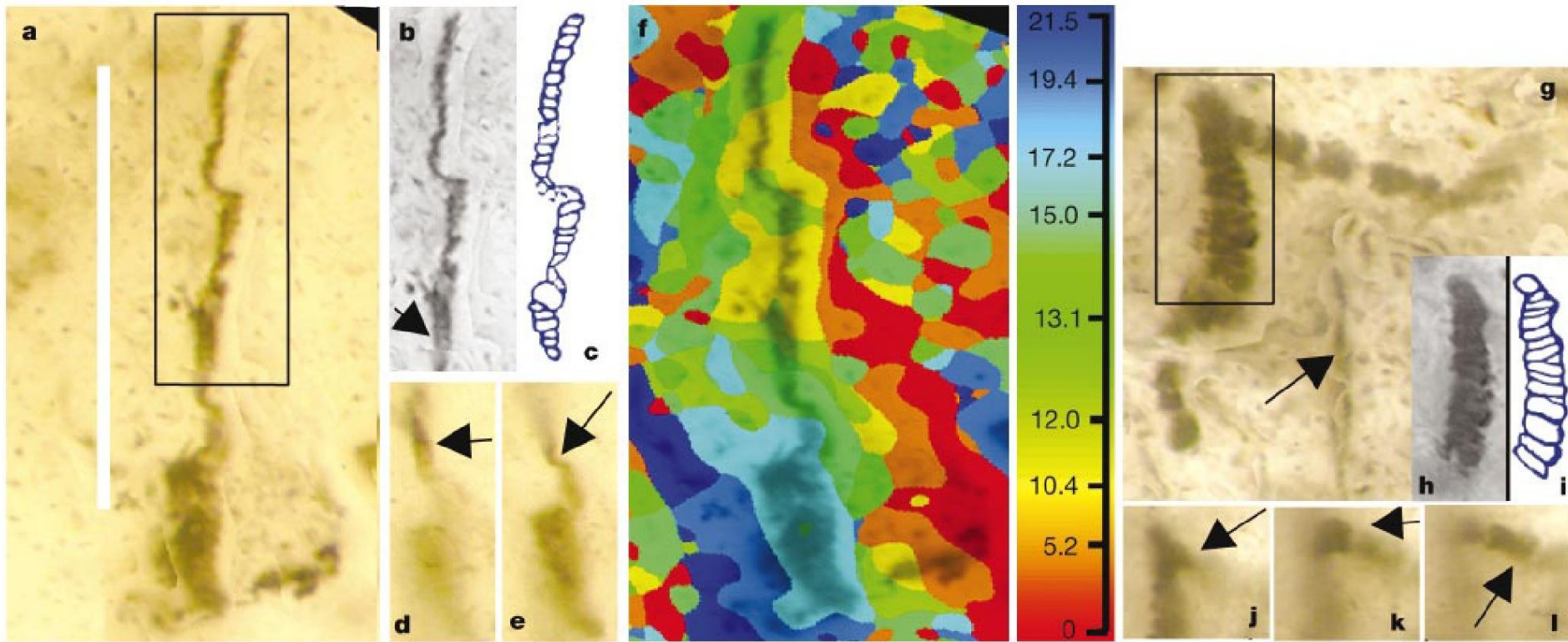


Figure 3 Automontages of inferred artefacts from the Apex chert. **a**, New image of putative beggiatoan *Eoleptonema apex* Holotype (ref. 3), combining the most sharply focused images from successive focal planes; **b**, **c**, digital image and interpretative sketch in the style of ref. 3 that omits the lower structure; **d**, **e**, new single image frames showing continuity of original and newly imaged structures. **f**, Topographic map showing

computer-selected focal planes (plus scale in μm) of **a**; **g**, new image of putative cyanobacterium *Archaeosclatoropsis disciformis* Holotype (ref. 3) showing rhombic ghost (arrow); **h**, **i**, digital image and interpretative sketch in the style of ref. 3 that omits the lower structure and side branch; **j**, **k**, **l**, new single image frames showing continuity of original and newly imaged structure. Scale bar, 40 μm .

Brasier et al.(2003)



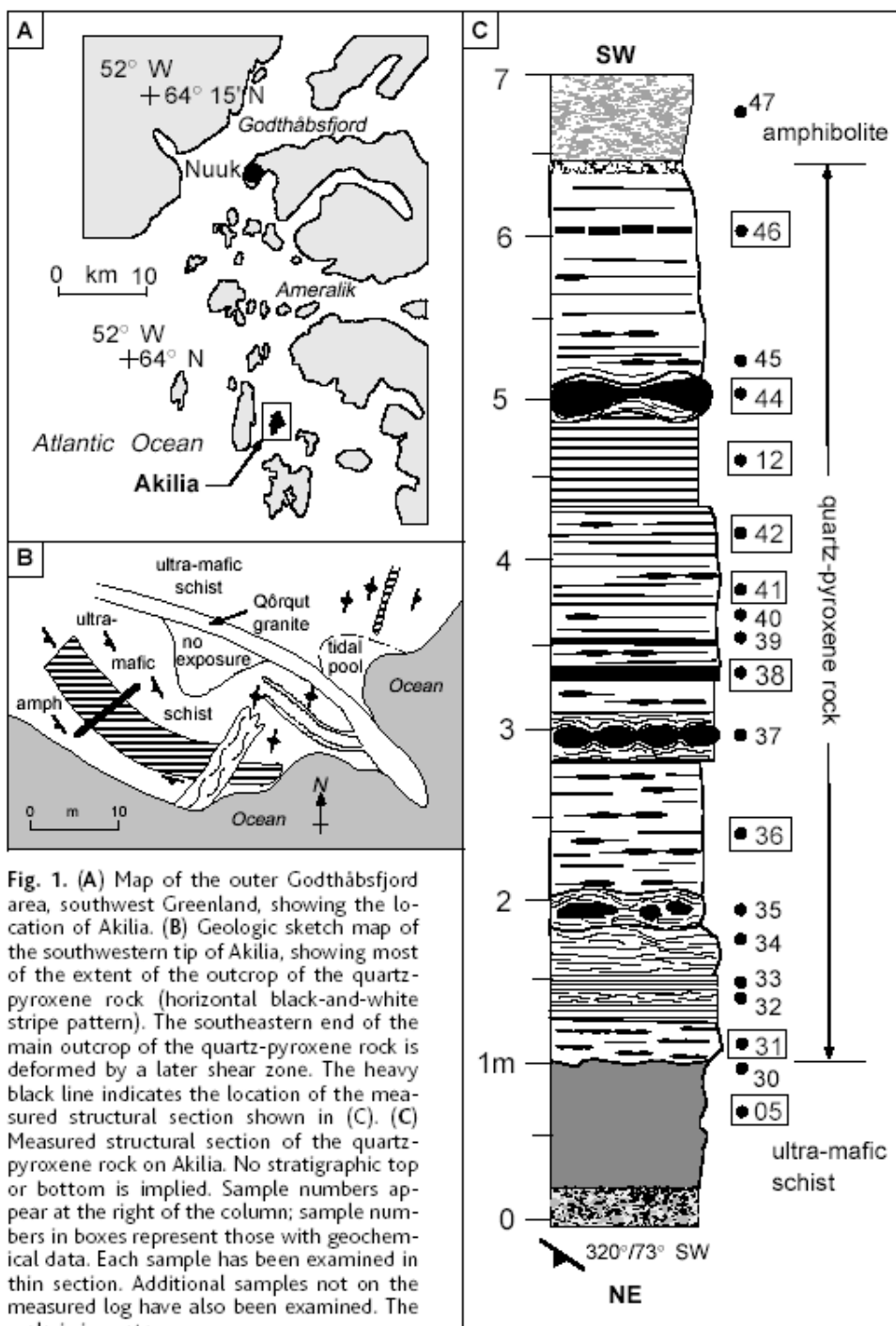
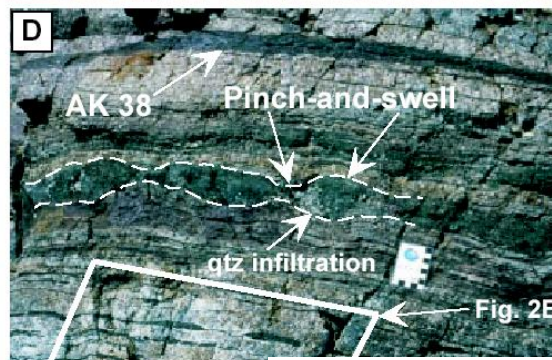
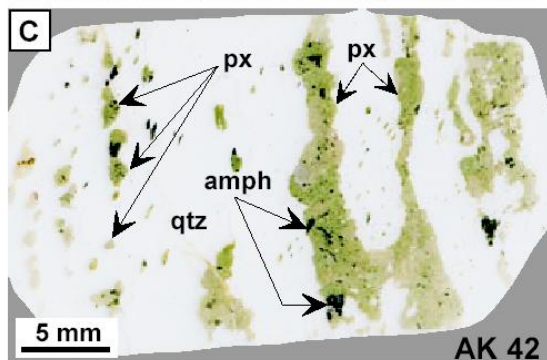
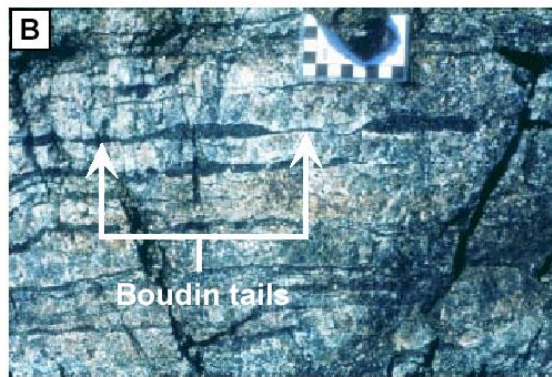
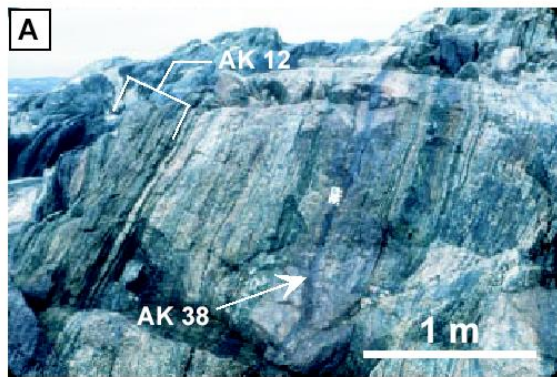


Fig. 1. (A) Map of the outer Godthåbsfjord area, southwest Greenland, showing the location of Akilia. (B) Geologic sketch map of the southwestern tip of Akilia, showing most of the extent of the outcrop of the quartz-pyroxene rock (horizontal black-and-white stripe pattern). The southeastern end of the main outcrop of the quartz-pyroxene rock is deformed by a later shear zone. The heavy black line indicates the location of the measured structural section shown in (C). (C) Measured structural section of the quartz-pyroxene rock on Akilia. No stratigraphic top or bottom is implied. Sample numbers appear at the right of the column; sample numbers in boxes represent those with geochemical data. Each sample has been examined in thin section. Additional samples not on the measured log have also been examined. The scale is in meters.

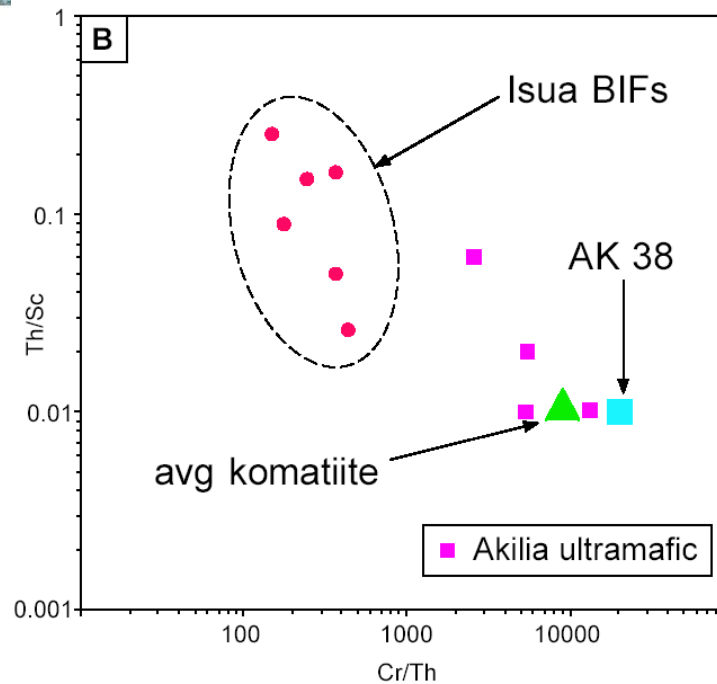
AKILIA アキリア

Fedo & Whitehouse(2002)
Nature
Mojzsisらの研究の否定論文

AkiliaのBIFは火成岩起源



Fedo and Whitehouse(2002)



¹³C-Depleted Carbon Microparticles in >3700-Ma Sea-Floor Sedimentary Rocks from West Greenland

Minik T. Rosing

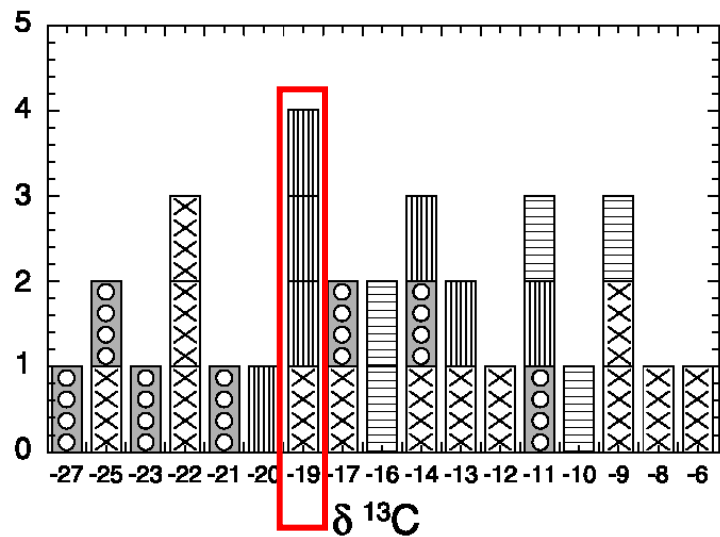
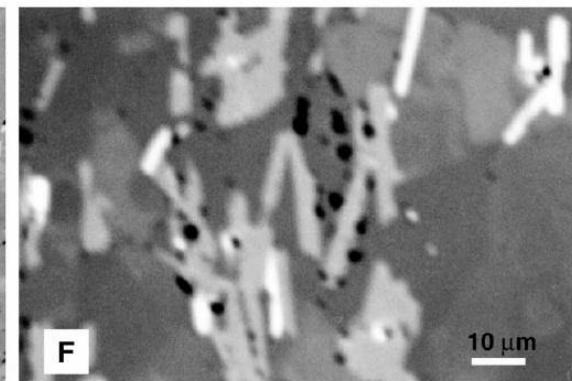
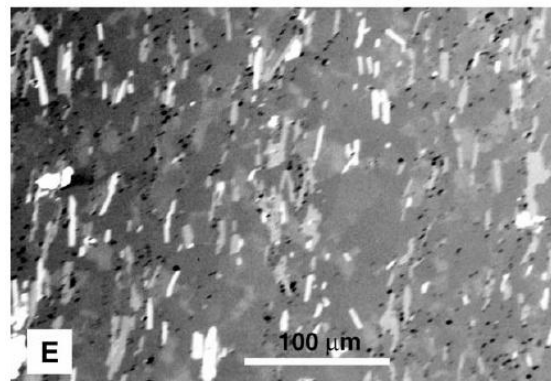
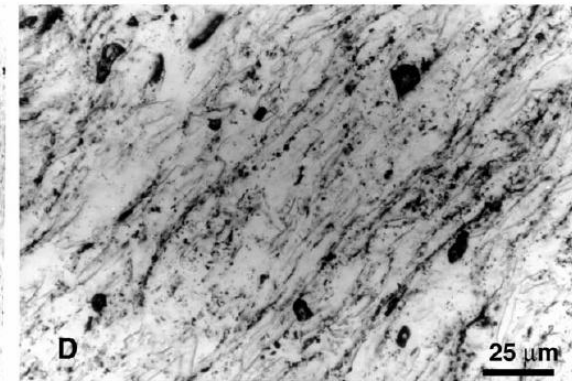
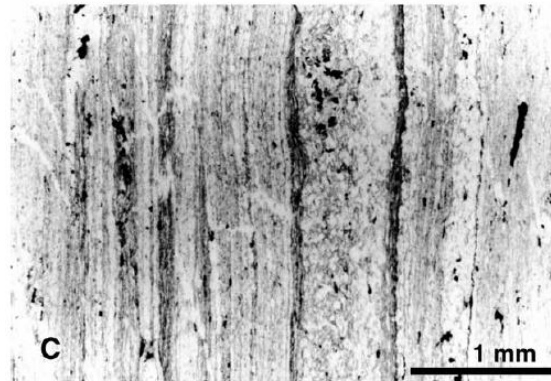


Fig. 3. Distribution of $\delta^{13}\text{C}$ values in classes of one unit of δ for the reduced C of bulk rock from Isua. The bars represent data from (2) (crosses), (3) (open circles), (4) (horizontal lines), and this study (vertical lines).

現時点での最も矛盾のない証拠:
ROISING(1999)SCIENCE



II. 分子化石の生物地球化学の研究史

- 化石有機物とは、「(生物)化石を構成する有機物」

- 生体有機物の主要成分→

生体高分子 (Biopolymer) : タンパク質, 炭水化物, 脂質, 核酸塩基 or 抵抗性高分子 (脂質の一部)

- 堆積物中の有機物 – ケロジェン, 石油, 天然ガス

- ‘化学化石’, バイオマーカーは基本的には堆積物有機物 – ‘化石有機物’ とは分ける.

- Biomarker バイオマーカー ~「生物指標分子」. 生物のみに由来する有機分子, あるいは特定の生物に由来する有機分子.

もとは, 原油中に含まれる成分にて定義された.

おもに生体脂質が, 堆積後の続成作用によって構造が単純化した (脱官能基, 低分子化) 分子が多い.

有機・生物地球化学の創成期の研究

- **P.H. Abelson**: 先駆者・創始者

1954年 デボン紀魚化石からアミノ酸検出(汚染), 古生化学の始まり.

1967年 石油のケロジェン成因説

1969年 Gunflint層(19億年前)ーアミノ酸(現在では汚染と考えられている)

- 1968年 ‘Chemical fossil’という用語を提案ーG. Eglinton, M. Calvin

- 1970年 マーチソン隕石からアミノ酸など有機化合物の検出ー K. Kvenvoldenら

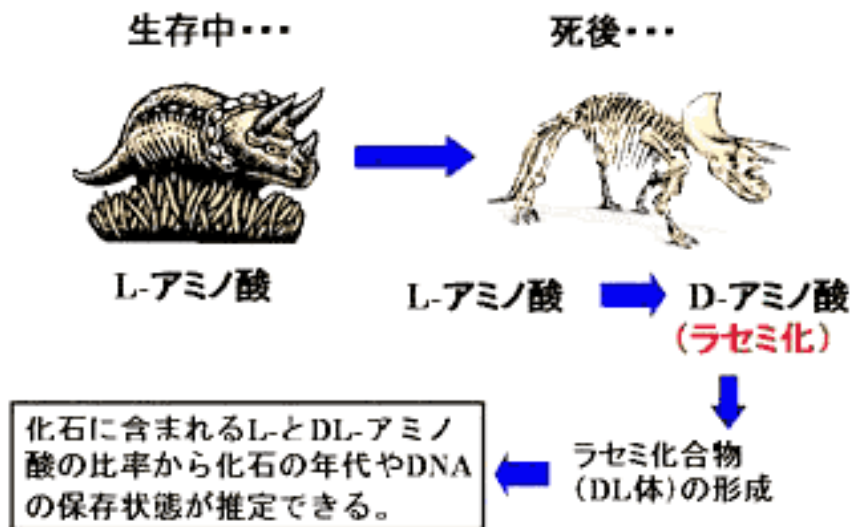
- 1986年 有機物古水温計(アルケノン)ー古気候プロキシーの発見 ーイギリスBristol大学グループが発見, 開発



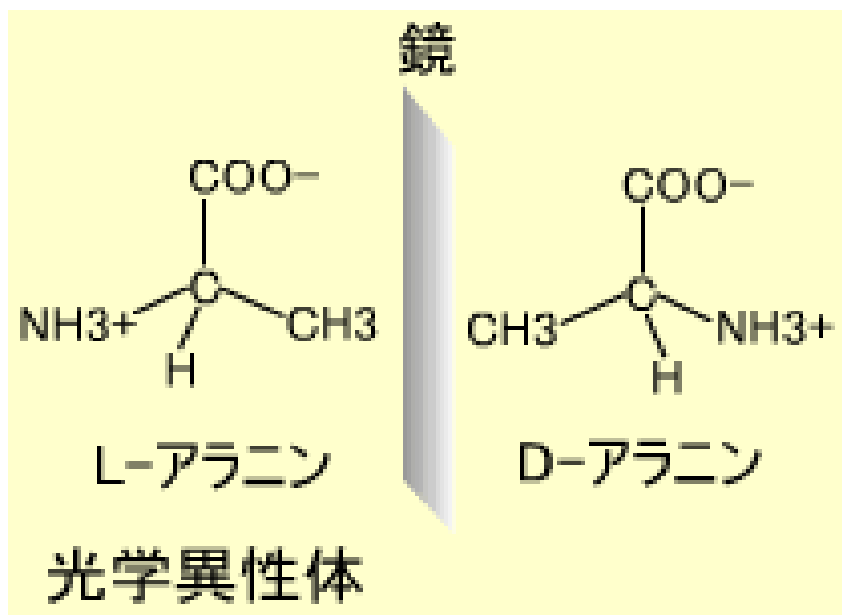
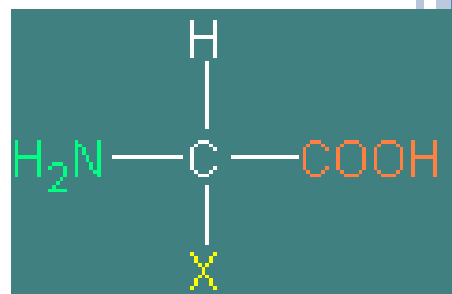
20種類のアミノ酸（R部分のみ）と略号(1文字)

アラニン (Alanine:A)	アルギニン (Arginine:R)	アスパラギン (Asparagine:N)	アスパラギン酸 (Asparagic acid:D)	シスチン (Cysteine:C)
$\begin{array}{c} \\ \text{CH}_3 \end{array}$	$\begin{array}{c} \\ (\text{CH}_2)_3 \\ \\ \text{NH} \\ \\ \text{C}=\text{NH} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{C} \\ / \quad \backslash \\ \text{O} \quad \text{NH}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{COOH} \end{array}$	$\begin{array}{c} \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{SH} \end{array}$
グルタミン (Glutamine:Q)	グルタミン酸 (Glutamic Acid:E)	グリシン (Glycine:G)	ヒスチジン (Histidine:H)	イソロイシン (Isoleucine:I)
$\begin{array}{c} \\ (\text{CH}_2)_2 \\ \\ \text{C} \\ / \quad \backslash \\ \text{O} \quad \text{NH}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} \\ (\text{CH}_2)_2 \\ \\ \text{COOH} \end{array}$	$\begin{array}{c} \\ \text{H} \end{array}$	$\begin{array}{c} \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{C} \quad \text{NH} \\ // \quad \backslash \\ \text{HC} \quad \text{CH} \\ \backslash \quad / \\ \text{N} \end{array}$	$\begin{array}{c} \\ \text{H}-\text{C}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$
ロイシン (Leucine:L)	リジン (Lysine:K)	メチオニン (Methionine:M)	フェニルアラニン (Phenylalanine:F)	プロリン (Proline:P)
$\begin{array}{c} \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH} \\ / \quad \backslash \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array}$	$\begin{array}{c} \\ (\text{CH}_2)_4 \\ \\ \text{NH}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} \\ (\text{CH}_2)_2 \\ \\ \text{S} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	$\begin{array}{c} \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH} \\ / \quad \backslash \\ \text{H}_2\text{C} \quad \text{NH} \\ \quad \backslash \\ \text{H}_2\text{C} \quad \text{CH}_2 \end{array}$
セリン (Serine:S)	スレオニン (Threonine:T)	トリプトファン (Tryptophan:W)	チロシン (Tyrosine:Y)	バリン (Valine:V)
$\begin{array}{c} \\ \text{CH}_2\text{OH} \end{array}$	$\begin{array}{c} \\ \text{H}-\text{C}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	$\begin{array}{c} \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{C}=\text{CH} \\ / \quad \backslash \\ \text{NH} \quad \text{C}_5\text{H}_4\text{N} \end{array}$	$\begin{array}{c} \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{C}_6\text{H}_4 \\ \\ \text{OH} \end{array}$	$\begin{array}{c} \\ \text{CH}_3-\text{CH} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$

アミノ酸のラセミ化

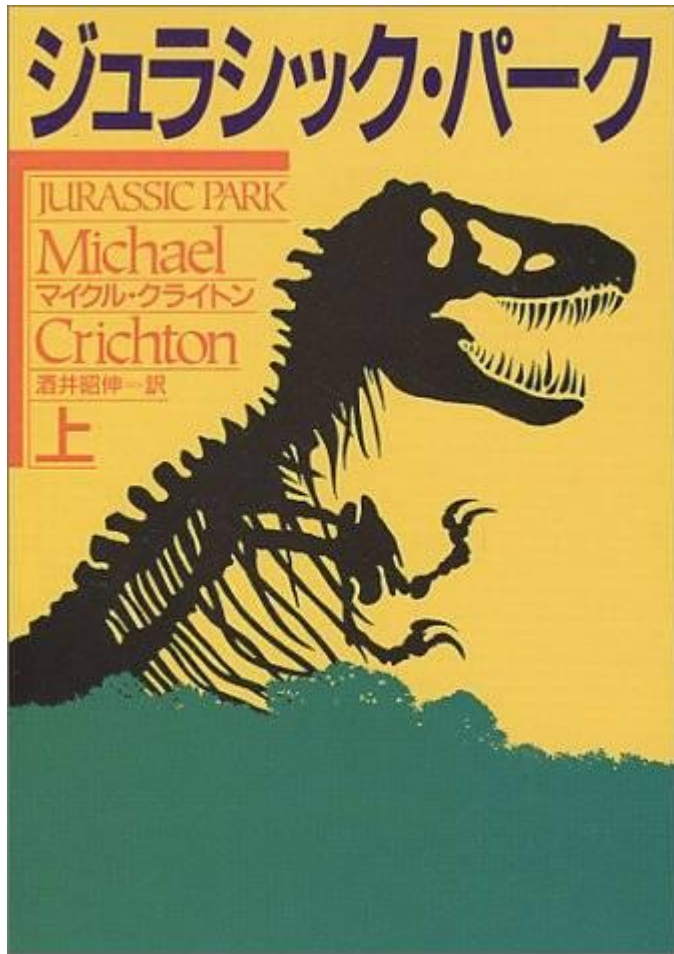


- 生体は生化学反応によりL体, D体の交換平衡を制御している → L体アミノ酸のみ合成
- 死後に, 熱的な化学平衡に達するように変化し, 最終的にL体, D体等量のラセミ体になる。



- Enantiomer エナンチオマー, 対掌体 (キラルな鏡像異性体) = D- and L- isomers Chiral center キラル中心, 不斉炭素はほとんどが1つ

化石DNAは残っているのか？



早川文庫NV引用



UIPJapanHP引用

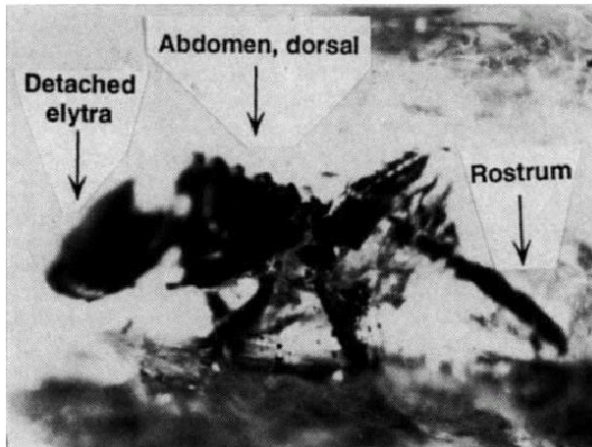


久慈琥珀博物館
HPより

琥珀の中の昆虫化石から恐竜の血液のDNAを復元 (SF)



琥珀中の化石DNAの研究



1.2～1.35億年前の
白亜紀の琥珀中の
ゾウムシ化石
DNAの検出に成功
(Cano, R.J. et al.,
1993,Nature)

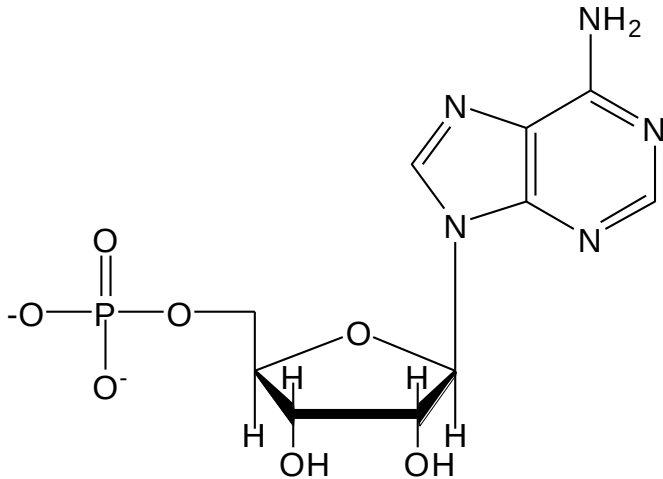
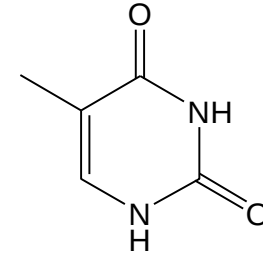
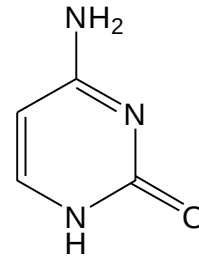
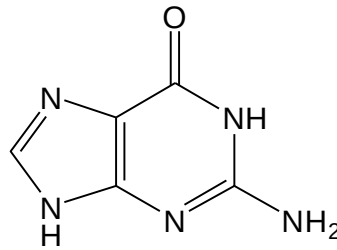
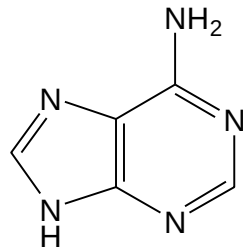


Photo by G O Poinar Jr

4～3.5千万年前の
古第三紀の琥珀中の
絶滅種の葉化石.
DNAの検出に成功
(Poinar, H.N. et al.,
1993,Nature)

- ～100万年前のDNA検出は極めて稀である.
- 完全保存のDNAの検出例なし.
- DNA欠損部分の補填するのは難しい(時間と費用が必要)
- 琥珀化石はほとんどが5～2.5千万年前.
 - ・バルト海沿岸域が有名.
 - ・日本では岩手県久慈(久慈層群;白亜紀後期)

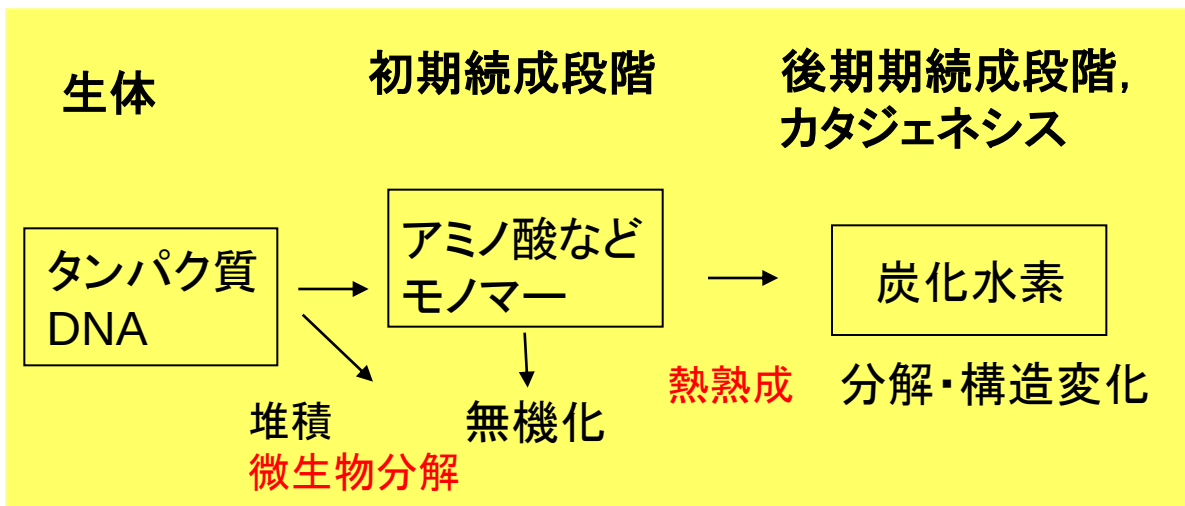




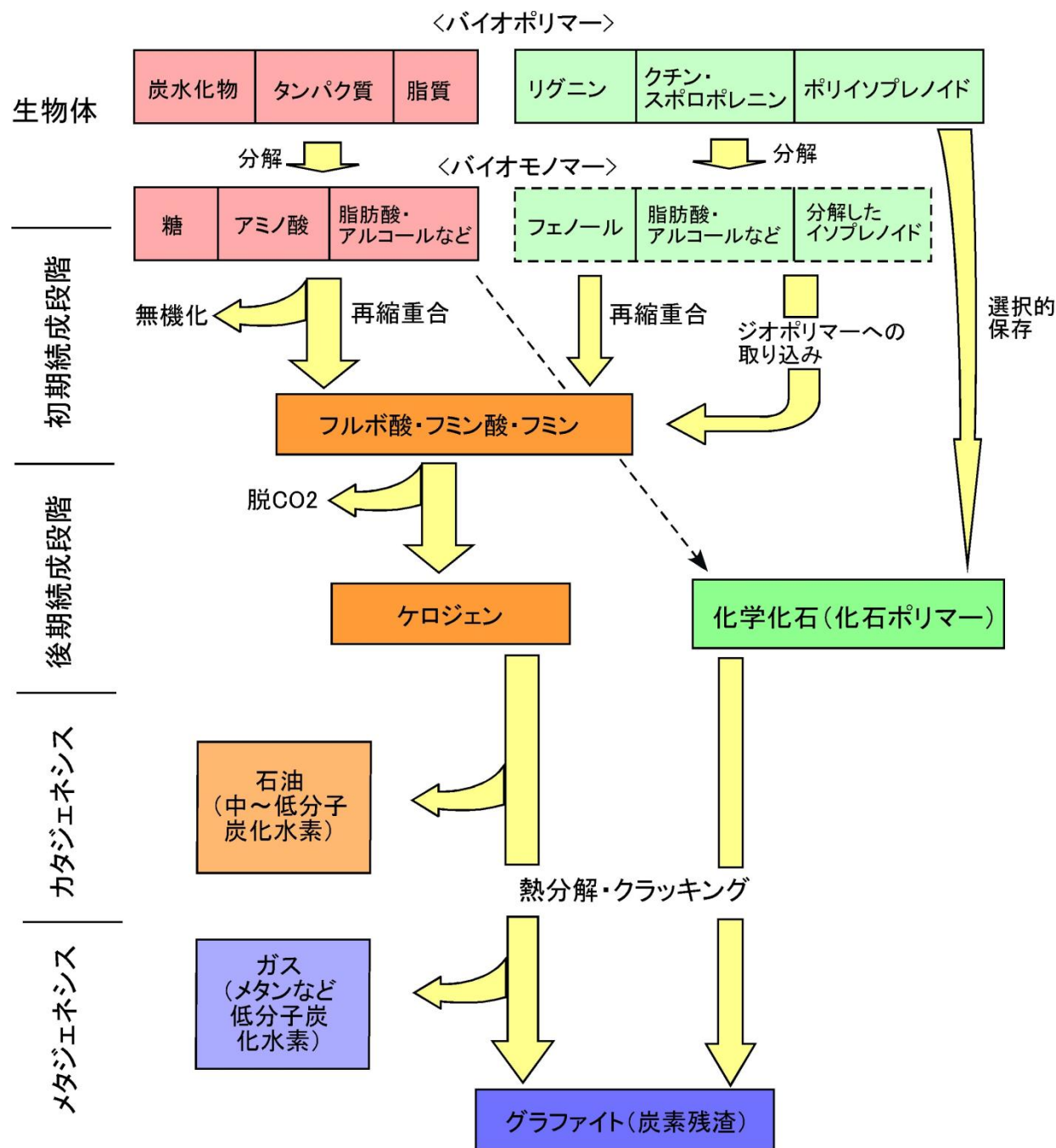
ヌクレオチドと
核酸塩基(プリン,
ピリミジン)

- 窒素(N)とリン(P)を含む化合物は分解されやすい。
←生物に消費される。

- 地球上の生物圏はNとPに飢えている！

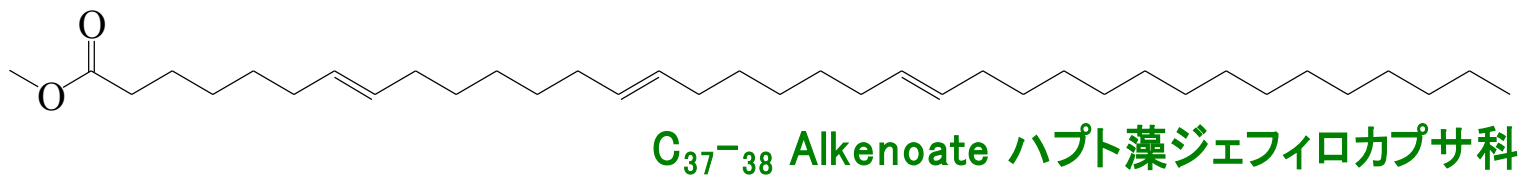
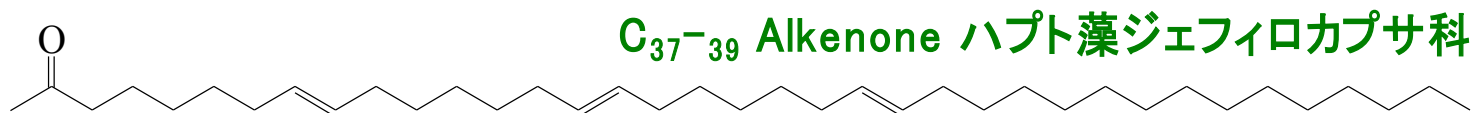
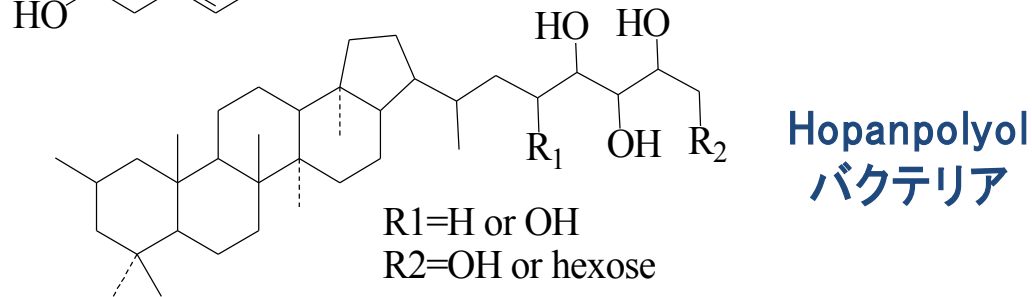
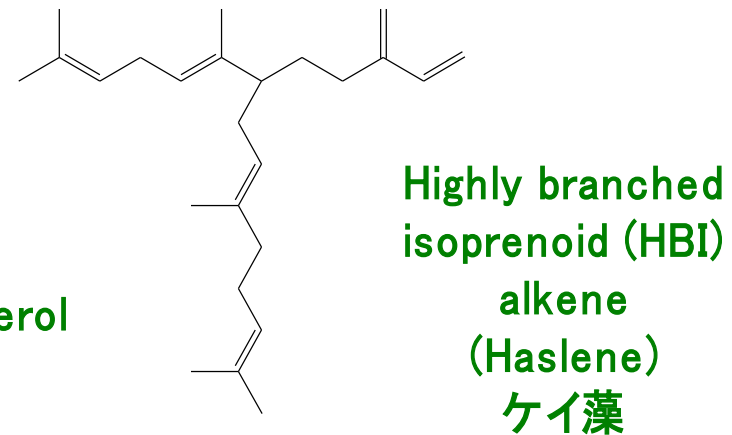
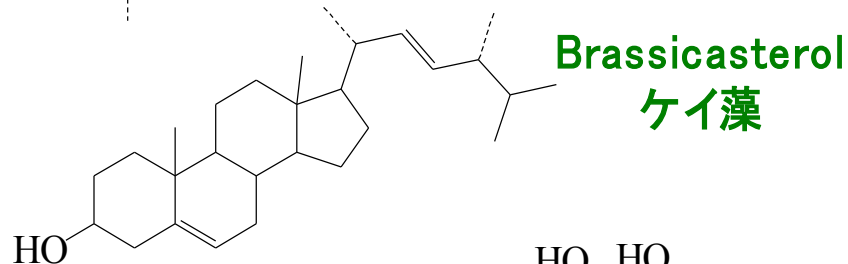
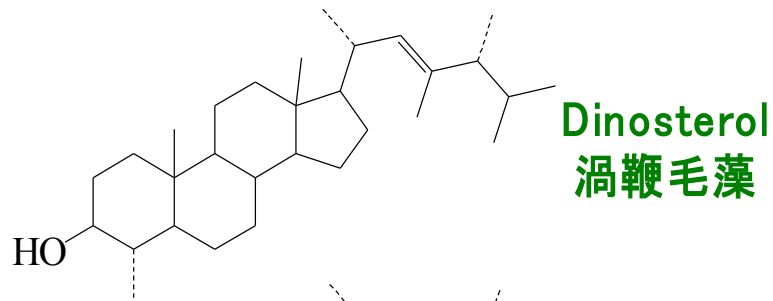


有機物の続成変化



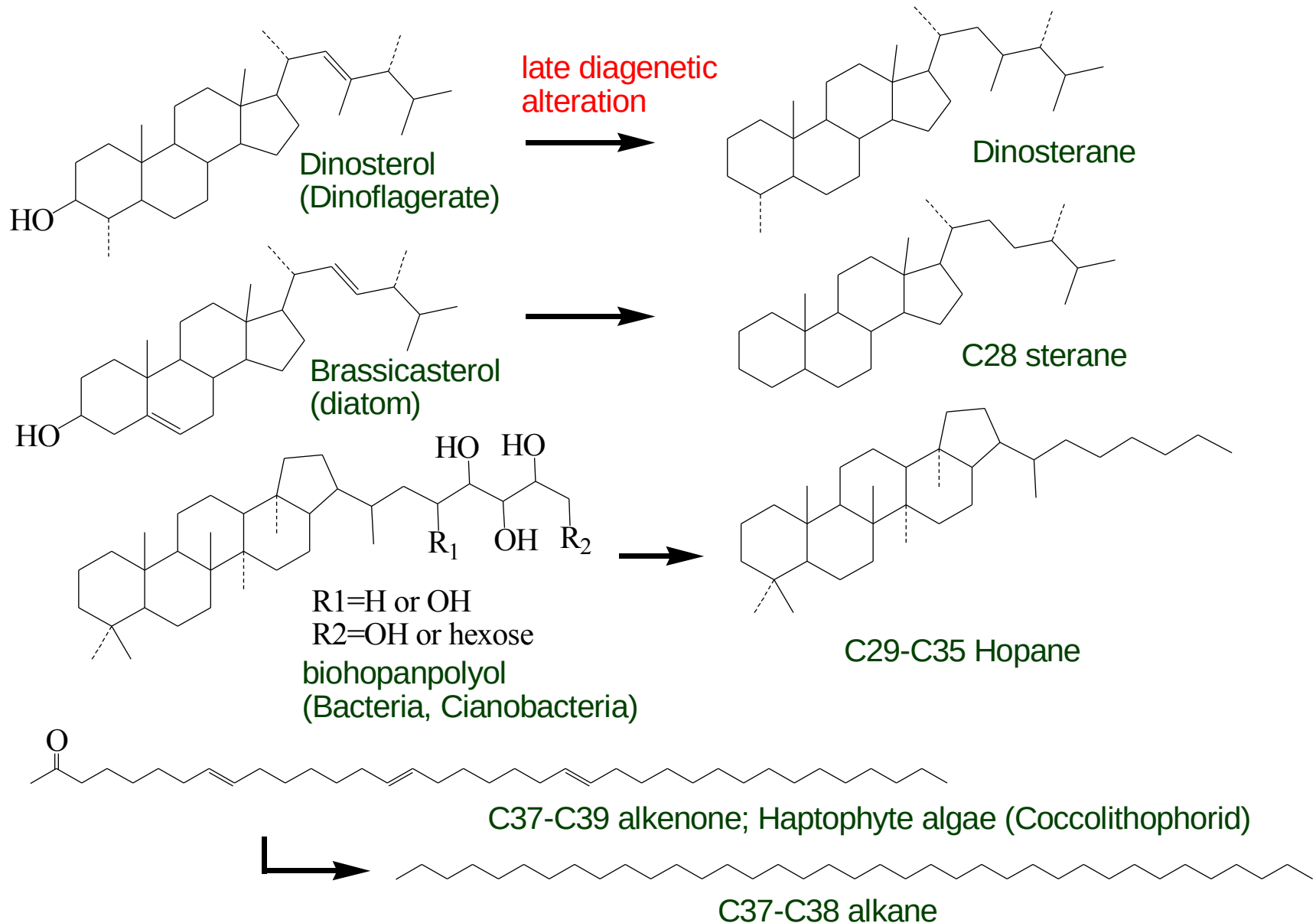
Tissot & Welte(1984),
Tegelaar et al.(1989),
Sawada(2006)

分子化石‘バイオマーカー’

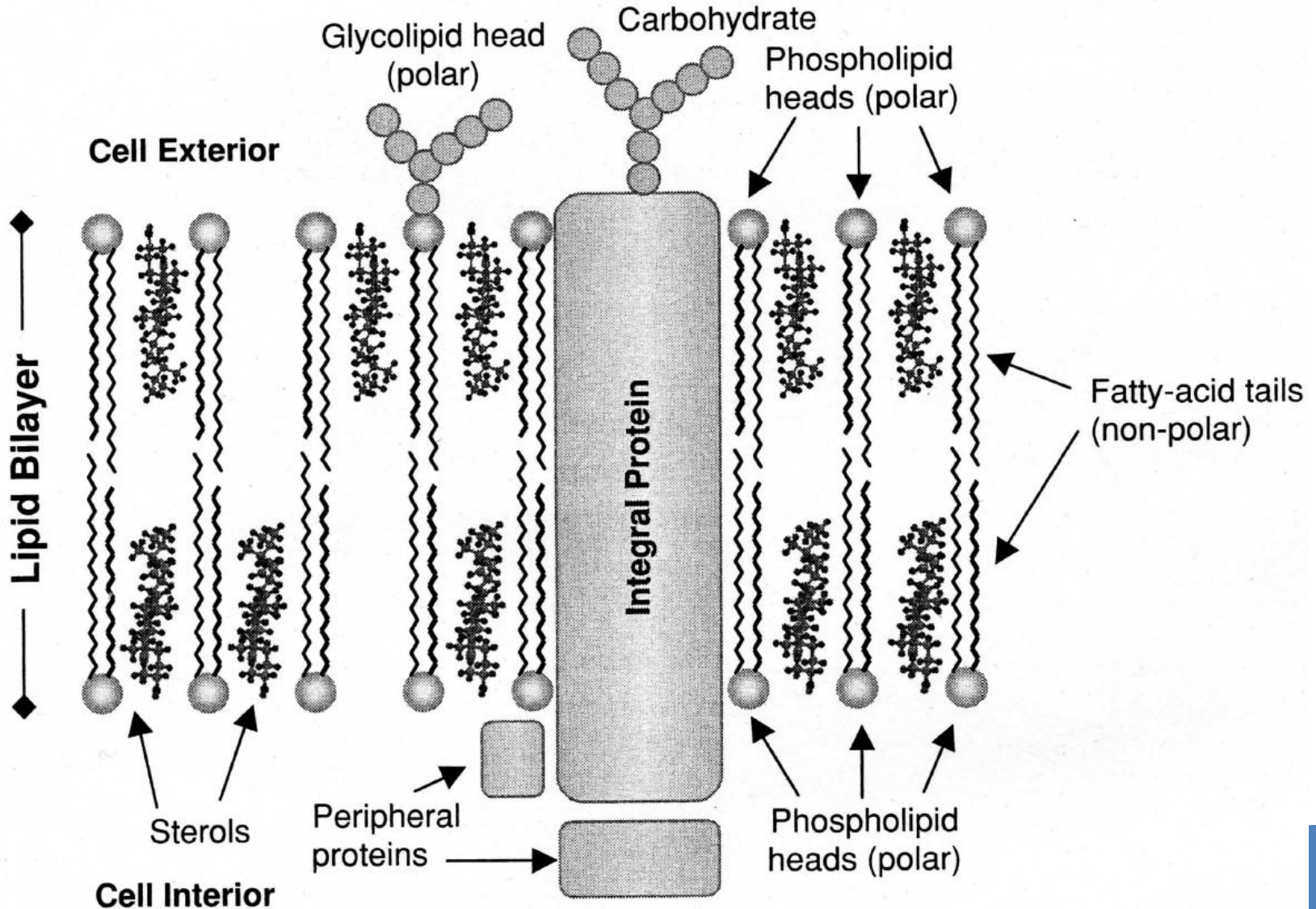


BIOMARKERS BIOLIPID, ~PLEISTOCENE

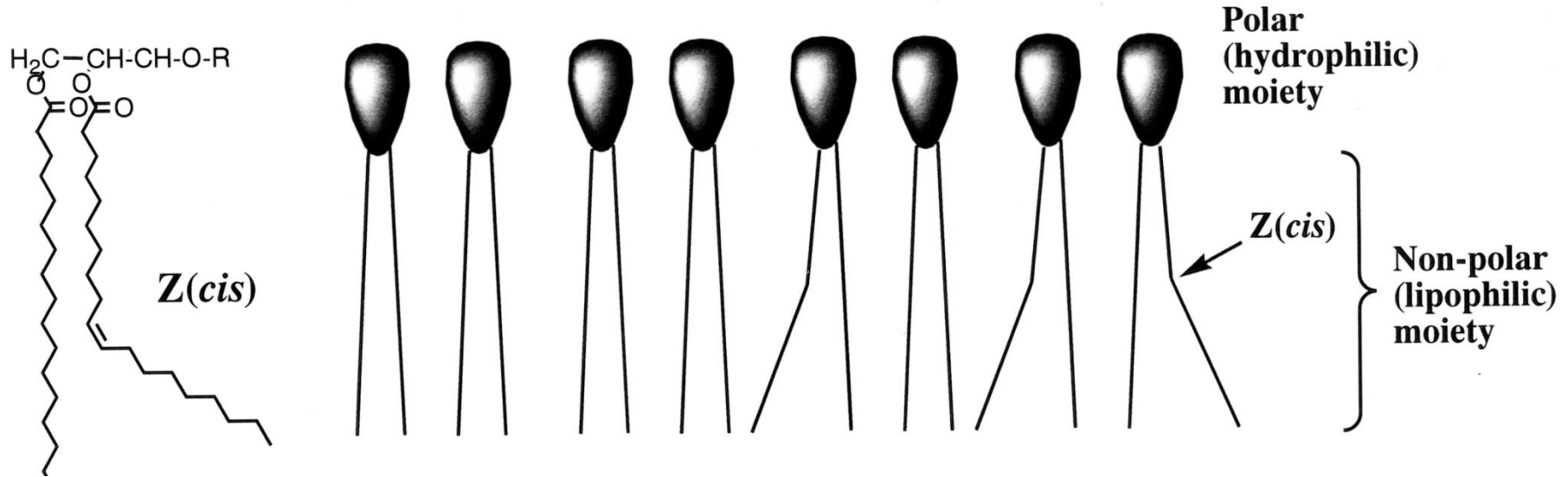
Biomarkers in Sedimentary rock, Neogene ~



膜脂質 (MEMBRANE LIPID)



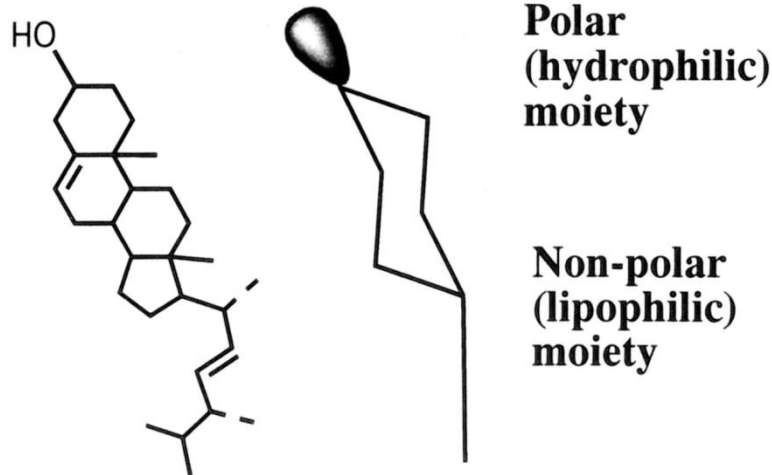
脂質二重層の流動性と温度



脂質二重層の転移温度
以下では結晶(ゲル)状
態になる.

炭素鎖が短いほど、
不飽和度が高いほど
→ 転移温度は低くなる.

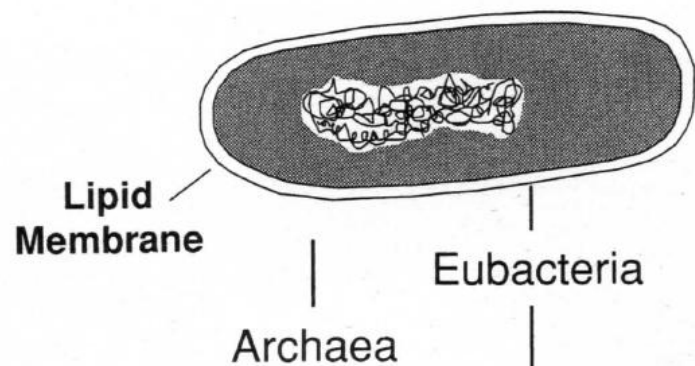
*cis*型が重要.



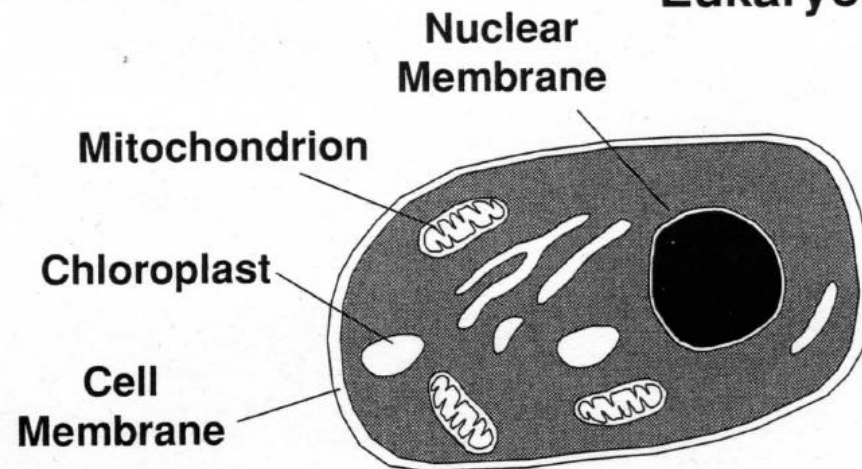
ステロイドは基本的に
流動性を低下させる. し
かし、結晶化を抑制 →
転移温度を下げる.

ステロイドは二層間を容
易に移動できるので、
変形を促進し、膜の柔
軟性を与える.

Prokaryota

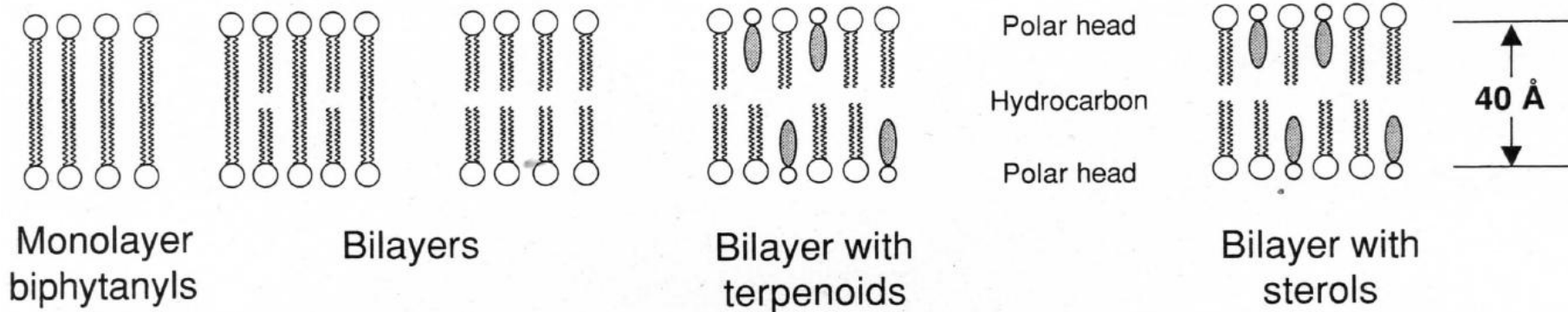


Eukaryota



Archaea

Eubacteria

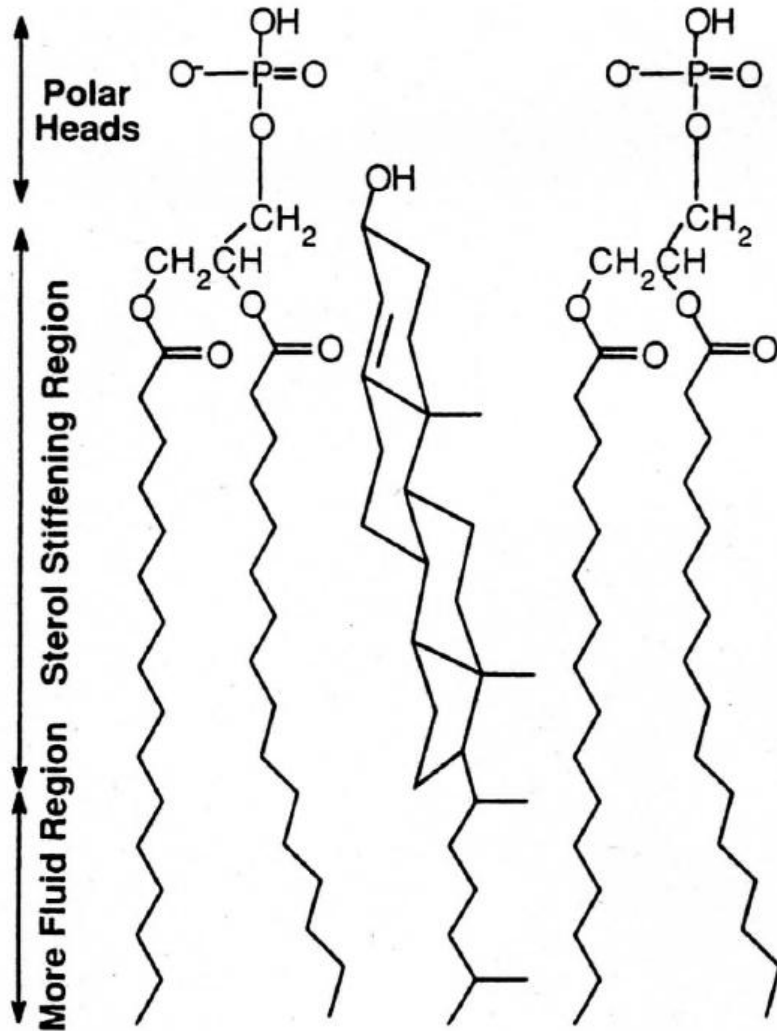


アーキア: エーテル脂質

バクテリア、真核生物: エステル脂質

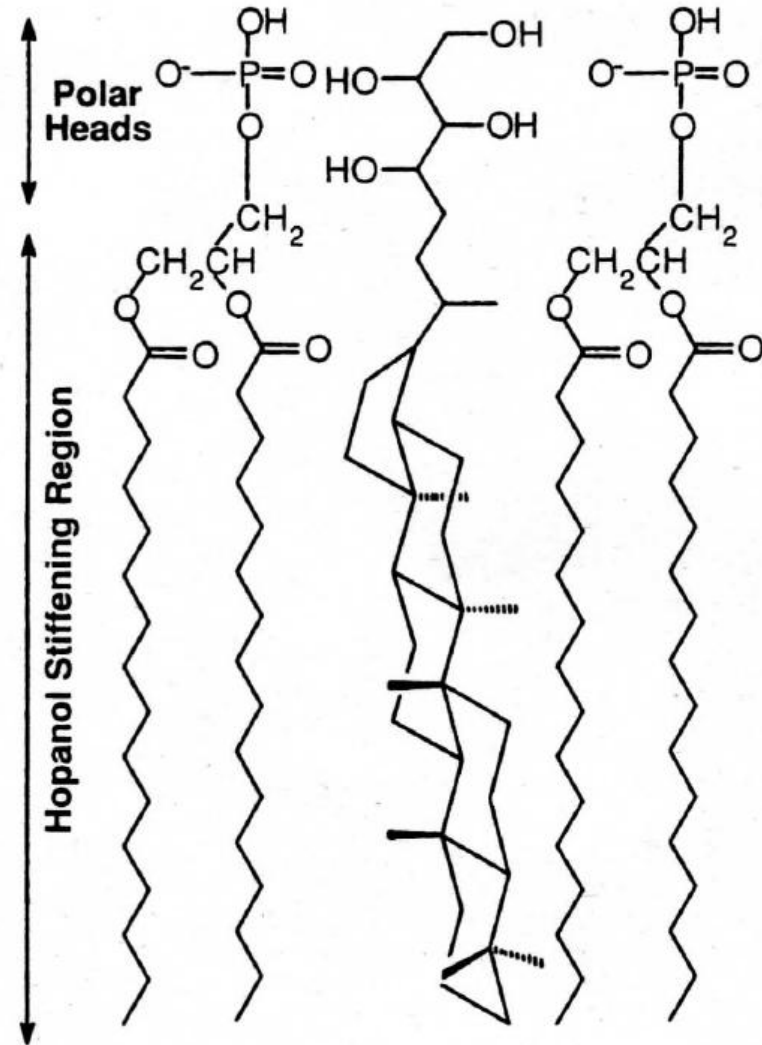
Peters et al.
Biomarker Guide

〈真核生物〉



ステロイド STEROID

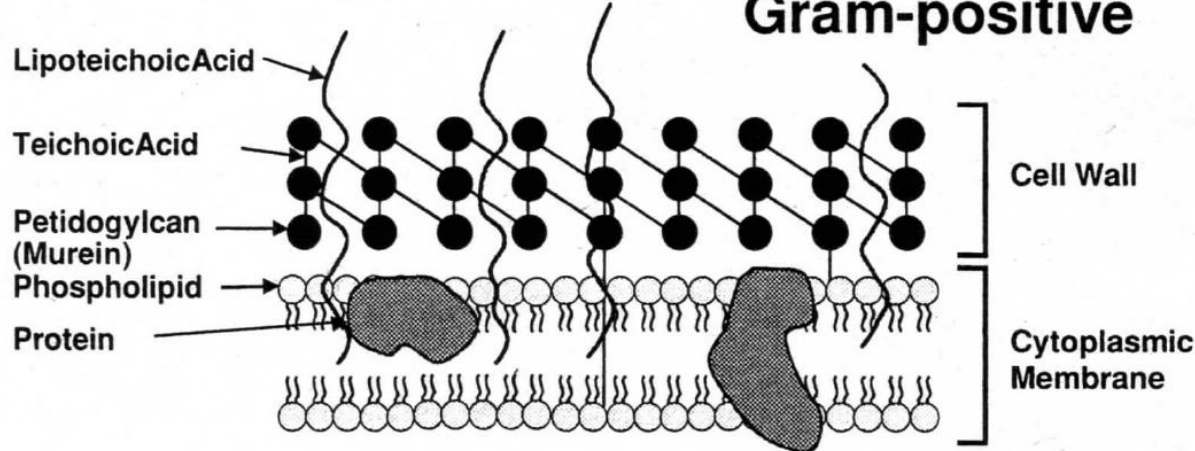
〈バクテリア〉



ホパノイド HOPANOID

グラム陽性菌とグラム陰性菌の細胞壁

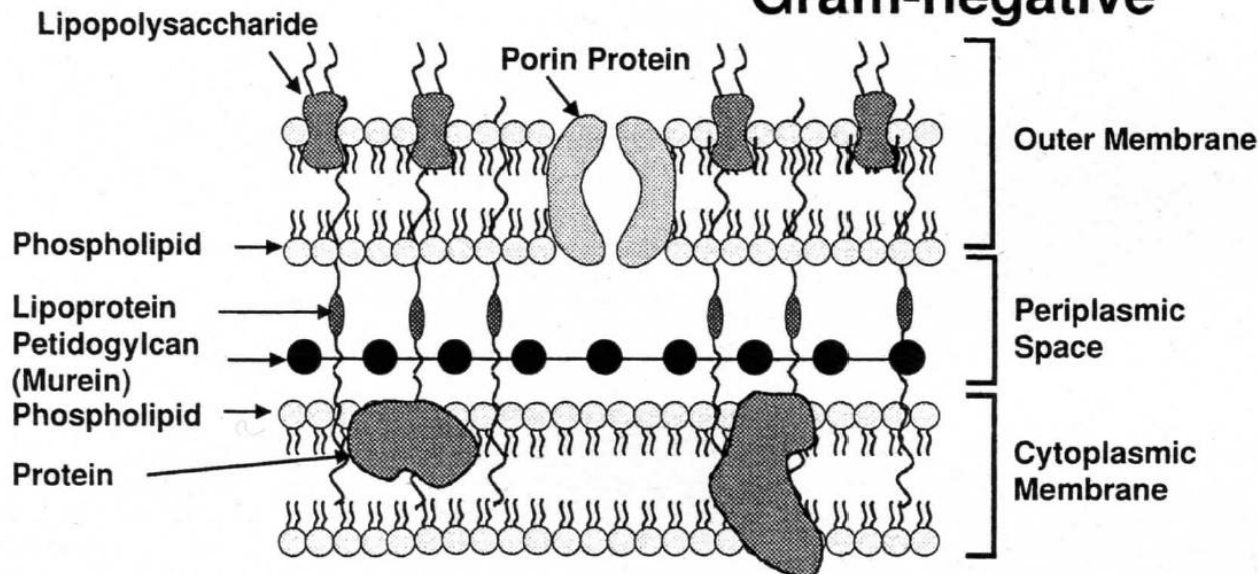
Gram-positive



グラム陽性菌
細胞壁が厚いペプチド
グリカンからなる。

ペプチドグリカンはD-
アミノ酸から成る。

Gram-negative



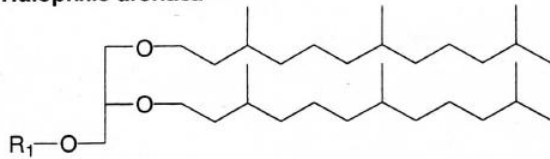
グラム陰性菌の仲間
＝シアノバクテリア

外膜と内膜(細胞膜)
が薄いペプチドグリカ
ンの壁をサンドイッチ
する形

Peters et al.
Biomarker Guide

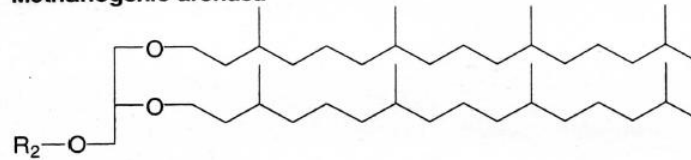
古細菌(アーキア)バイオマーカー = Archaeol アーキオール GDGT(isoprenoid glycerol dialkyl glycerol tetraethers)

Halophilic archaea

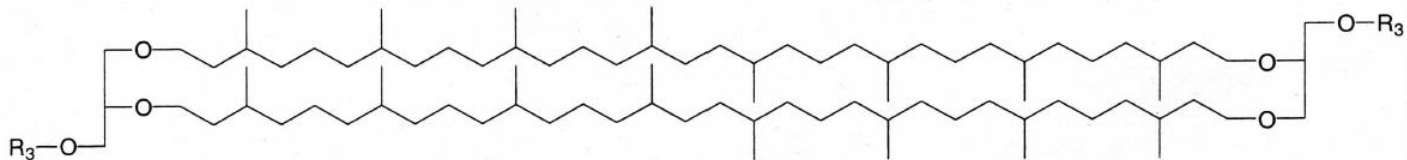


R₁ = phosphate-containing polar head, or sugar residues

Methanogenic archaea

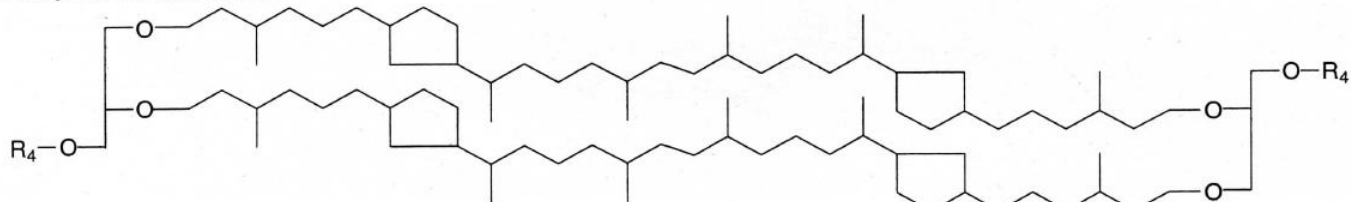


R₂ = phosphate- and phosphoamino-containing polar head



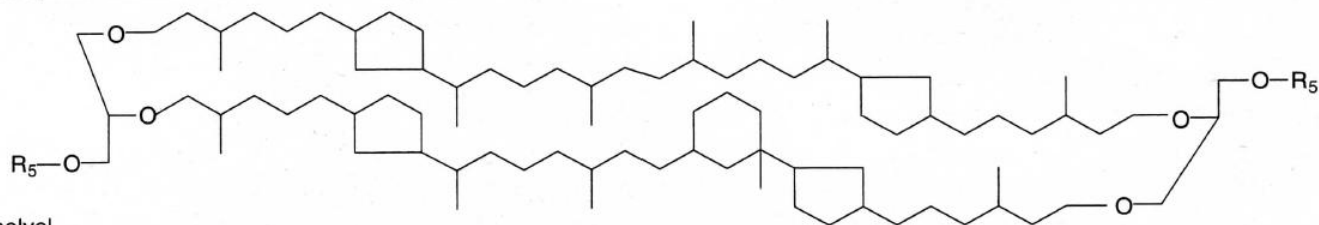
R₃ = sugar residues

Thermophilic Crenarchaeota

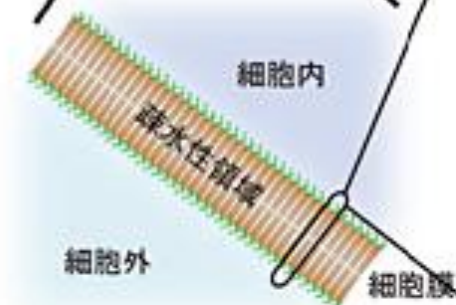


R₄ = polyol, and/or sugar residues and sulfate

Psychrophilic Crenarchaeota



R₅ = polyol



細胞膜の模式図
極性脂質による膜が細胞内外の境界となっている
(実際は膜の外側に細胞壁などの構造が存在する)

細胞膜を構成する極性脂質の構造(例)

バクテリア

アーキア

親水性部分

疎水性部分

親水性部分

頭部
(リン酸基)

グリセロール部

エステル結合

脂肪酸

水

油

脂質

細胞膜を構成する

極性脂質構造の違い

によってバクテリアと

アーキアを見分ける

ことができる

また、頭部は細胞の

死後速やかに分解さ

れてしまうため、極

性脂質は「生きた」

微生物の指標として

用いることができる

頭部
(糖など)

グリセロール部

エーテル結合

脂肪酸

水

油

脂質

細胞膜を構成する

極性脂質構造の違い

によってバクテリアと

アーキアを見分ける

ことができる

また、頭部は細胞の

死後速やかに分解さ

れてしまうため、極

性脂質は「生きた」

微生物の指標として

用いることができる

イソプレノイド

脂肪酸

脂質

細胞膜を構成する

極性脂質構造の違い

によってバクテリアと

アーキアを見分ける

ことができる

また、頭部は細胞の

死後速やかに分解さ

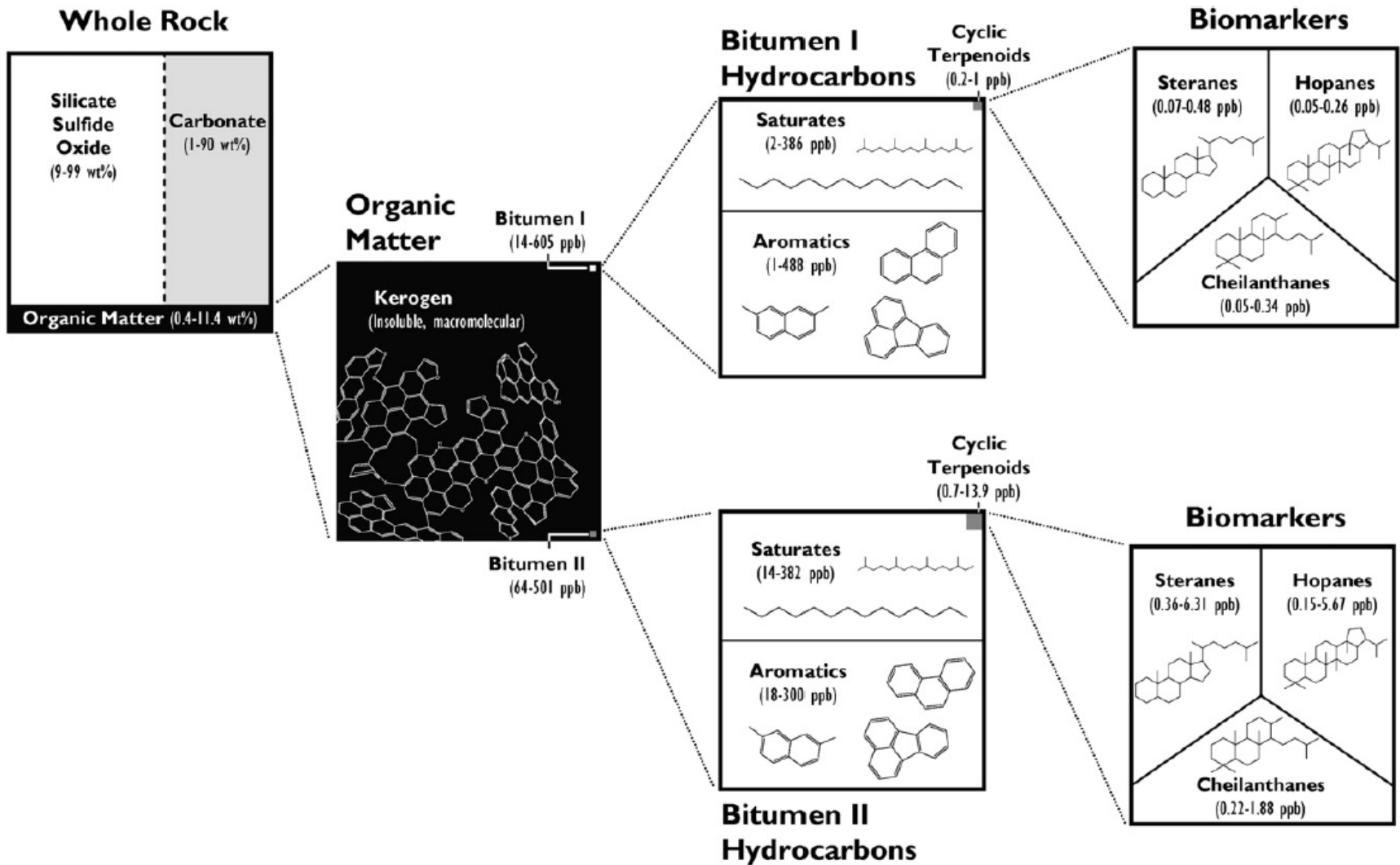
れてしまうため、極

性脂質は「生きた」

微生物の指標として

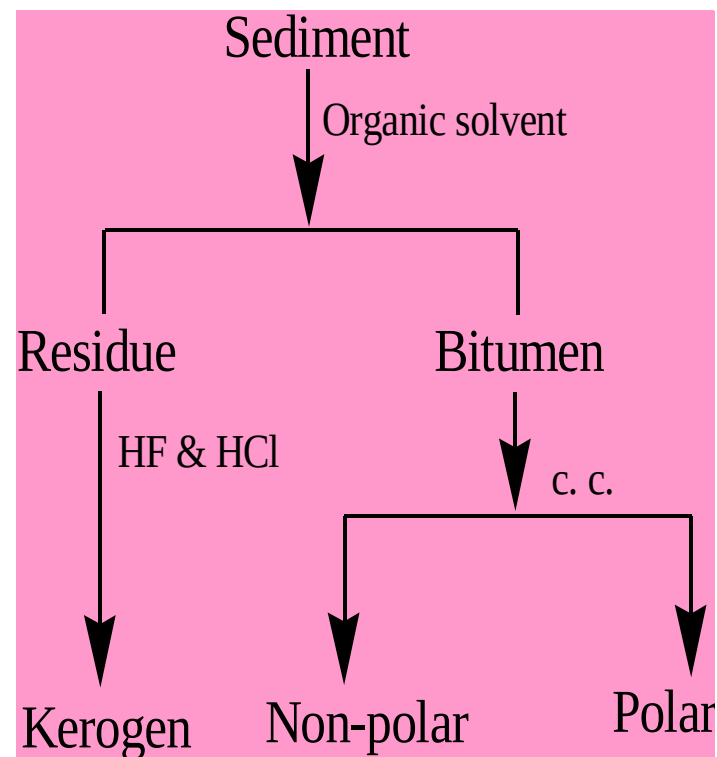
用いることができる

JAMSTEC HP引用



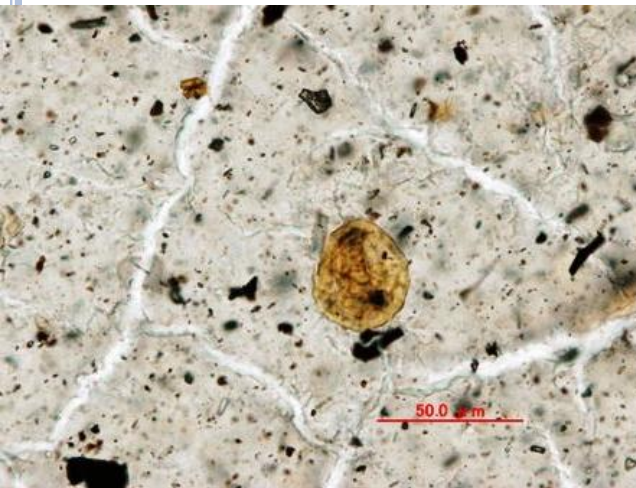
ジオポリマー, ケロジェン

- ケロジェン(kerogen)～有機溶媒, 強酸, 強塩基に溶けない有機物の総称. 処理の画分としての定義. 石油地質学用語.
- フミン(humin)～土壌中の強酸, 強塩基に溶けない有機物の総称. 腐食物質ともいう.
- ジオポリマー(geopolymer)～堆積物に保存された生体有機物やその続成生成物から形成された巨大分子集合体.

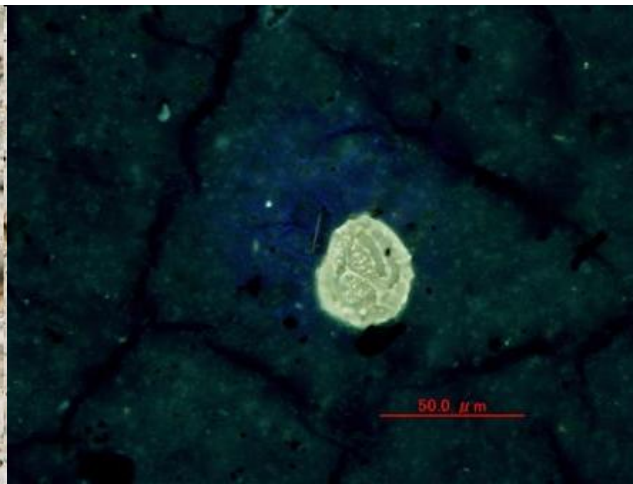


生命の痕跡～分光学的アプローチ

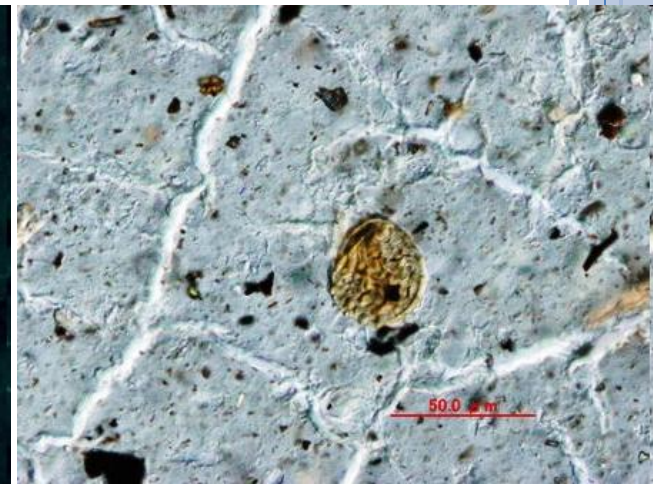
- 蛍光顕微鏡
- 電子顕微鏡(走査型)-SEM
- 赤外分光(IR)- 顕微FT-IR, 赤外顕微鏡
- ラマン分光- レーザーラマン分光
- ケロジェン(生物起源)かアモルファスグラファイト(非生物、無機)を判断する



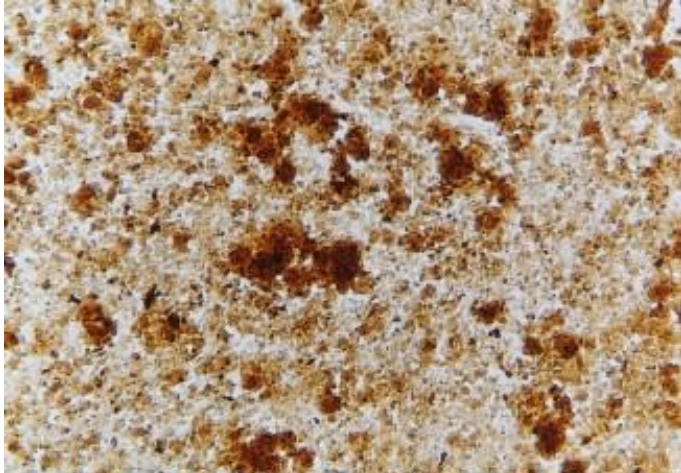
透過顕微鏡



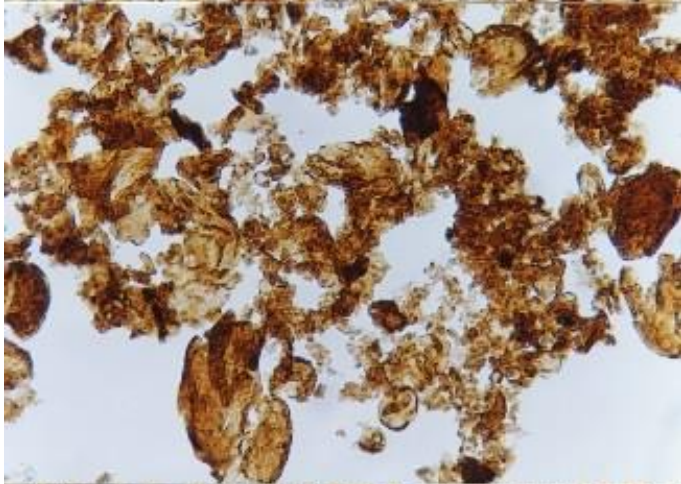
蛍光顕微鏡



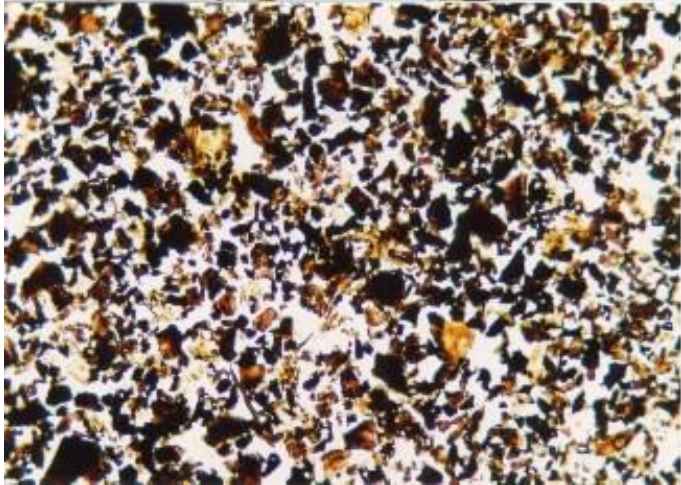
微分干渉像



Amorphous
Kerogen (Weak
Fluorescent: WFA)
(Diatom origin)



Sporinite & Cutinite
(Pollen/spore &
cuticle origin)



Vitrinite & Non flur.
Amorphous (NFA)
(Wood origin)

MIOCENE
PALEO-JAPAN
SEA
(ONNAGAWA F.
SHALE)

○ Photographs
under
microscope



ケロジェンの形成過程

- 生体がもともと持つ硬組織に由来する難分解性マクロ分子 (Refractory biomacromolecule) ～選択的に保存. 不活性な分子.
- ジオポリマー化: 分解後に再縮重合する～もともと分解されやすい分子. バクテリアなどが直接介在している. 官能基置換反応や硫黄などの付加反応. バイオマーカーも取り込まれていることがわかっている

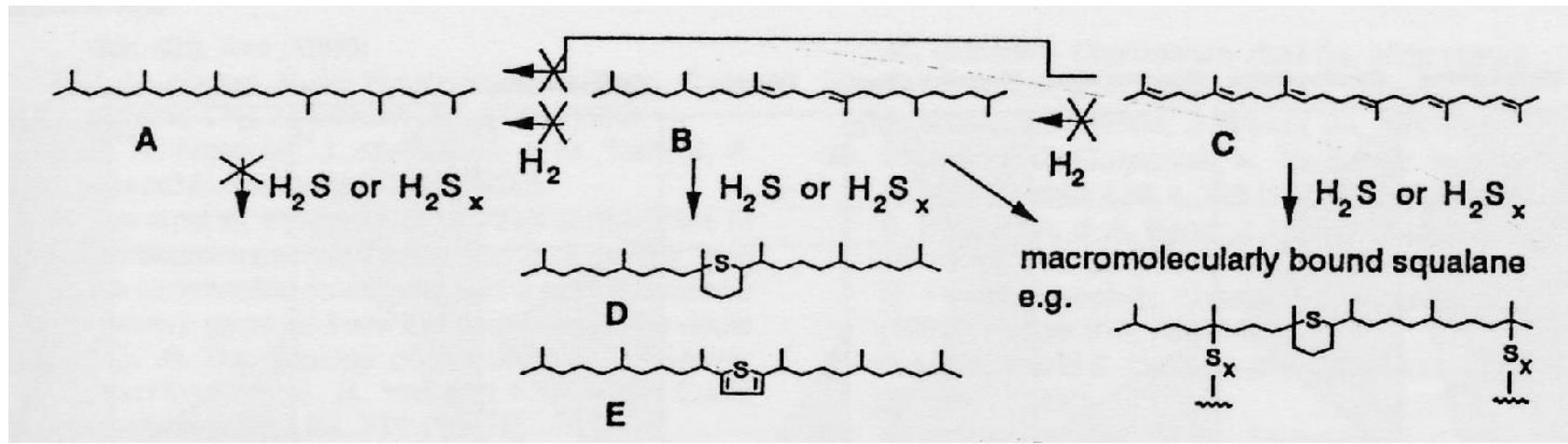
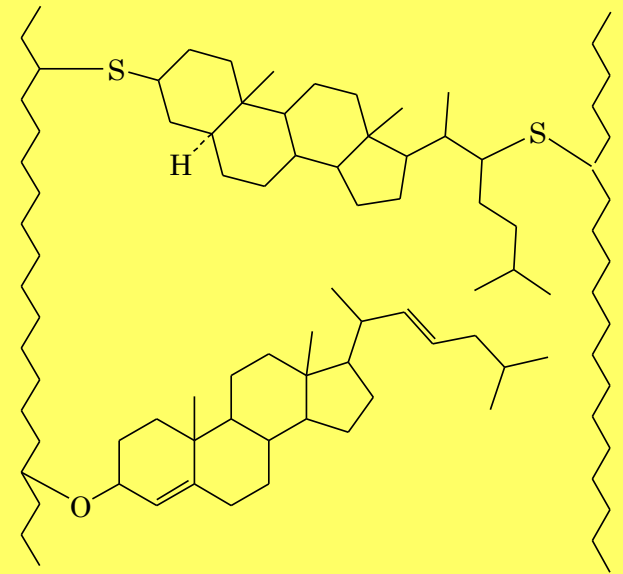
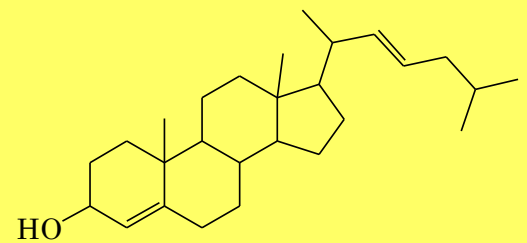
硫黄に関係したジオポリマー化 = 加硫(Vulcanization)

H_2S やpolysulfideによって取り込まれる. <-架橋結合

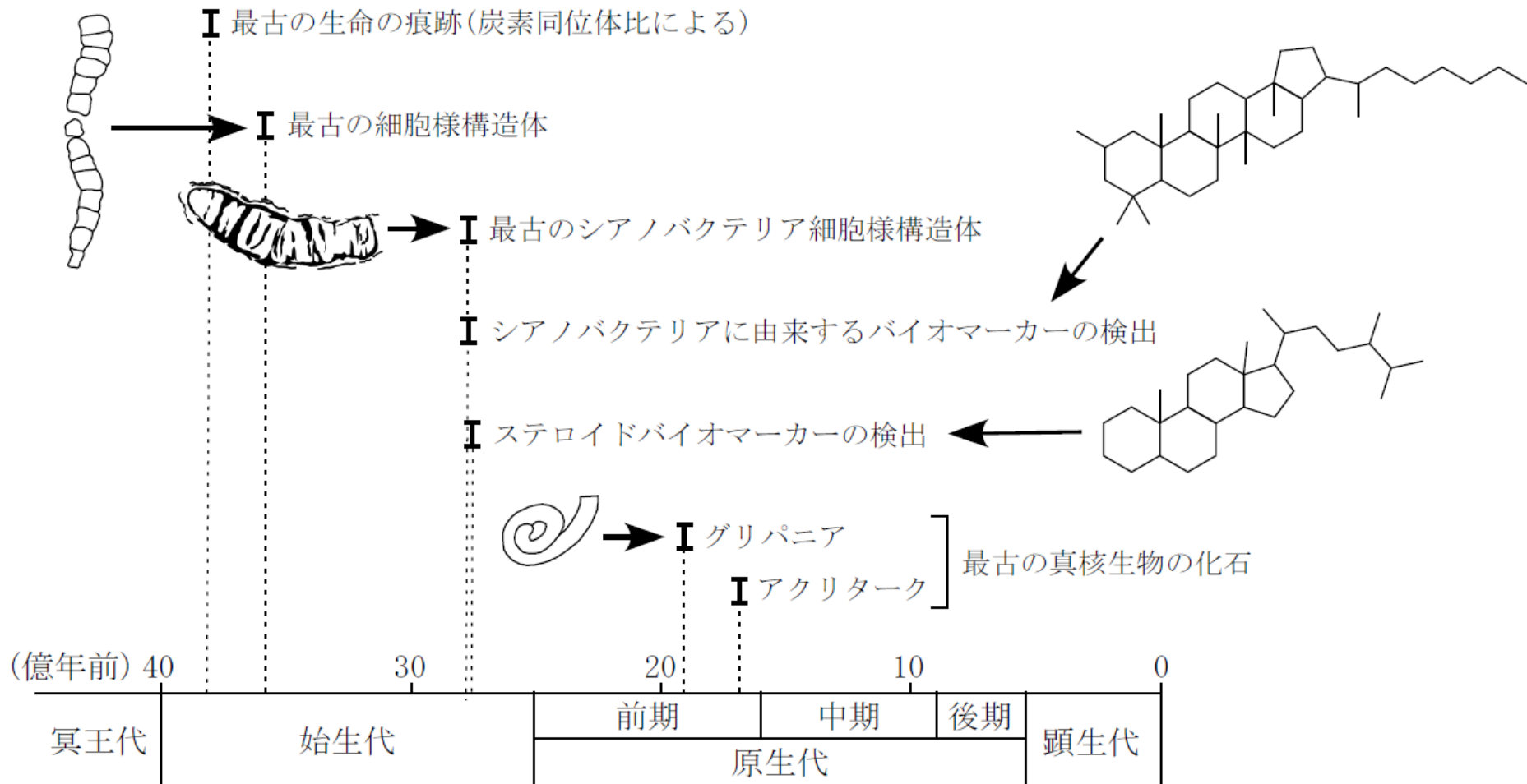
生体分子が取り込まれて残る- 'sequestration'

ジオポリマー全体が硬化する-分解されにくくなる

- Vairavamurthy and Mopper (1987)*Nature*,
- Kohnen et al. (1989)*Nature*; -(1992)*Science*,



生命の起源, 初期生命の研究



生命の起源および生物進化の主な出来事の地質年代(堀口健雄, 2008)。化石(Schopf, 1993, Han and Runneger, 1992, Knoll, 1994)またはバイオマーカー(Brocks et al.1999)の証拠に基づく。

先カンブリア紀のステランの問題

- 真核生物の出現との関連

ステランの最古検出年代 - 27億年前 (Brocks, 1999, Science)

化石記録の最古年代 (グリパニア) - 19億年前

8億年古い.

シアノバクテリアの出現年代とほとんど同時.

パスツールポイント (O_2 濃度 $>0.1PAL$)

- ミトコンドリア (グラム陰性菌の
 α -プロテオバクテリアに由来) の活発化

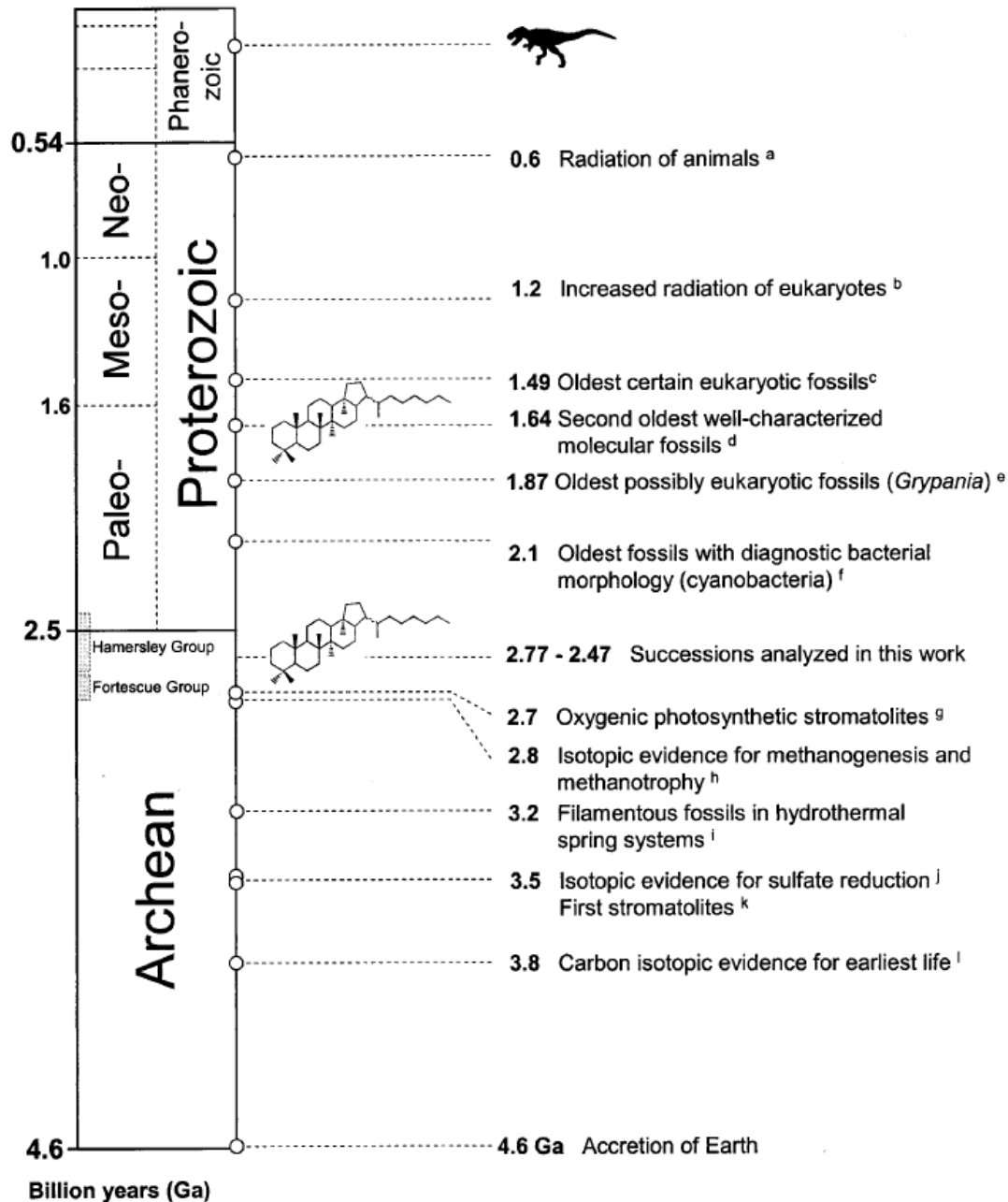
- 原核生物由来のステロイド関与の可能性

ステロール生産する原核生物:

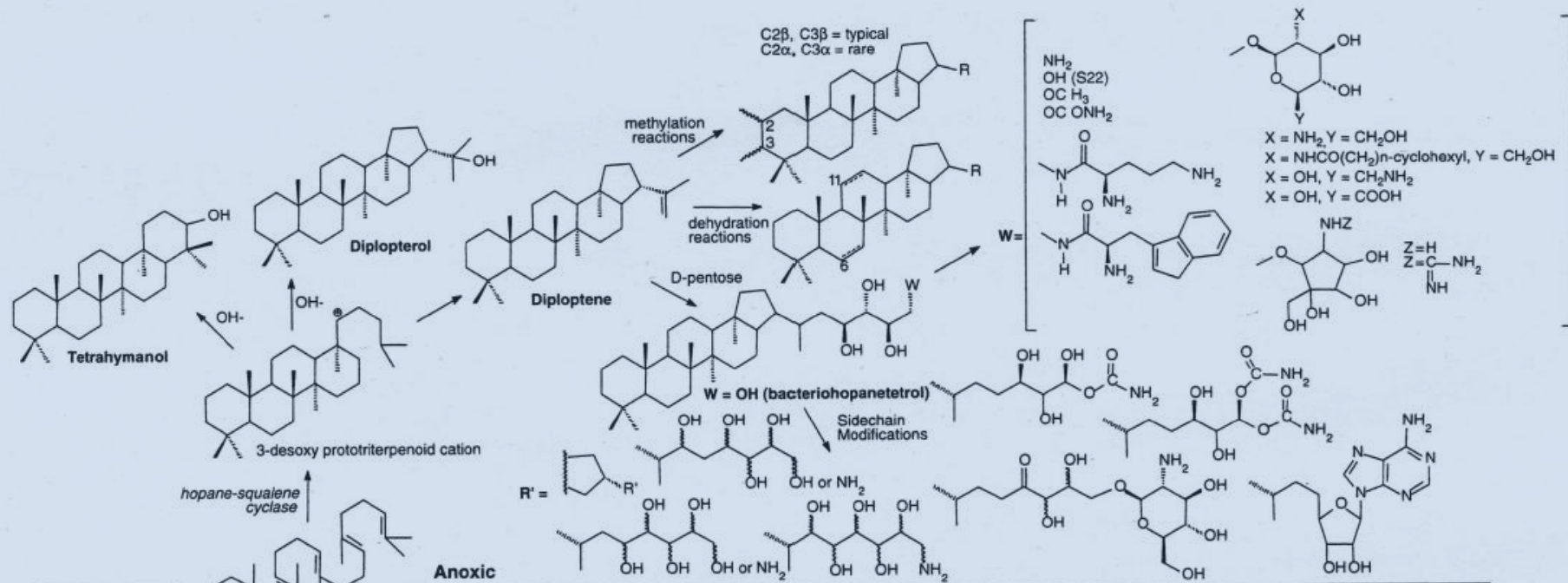
メタン酸化細菌 (Schouten et al., 2000, FEMS Microbiol. Lett.)

シアノバクテリア (Hai et al., 1996, Phytochemistry)

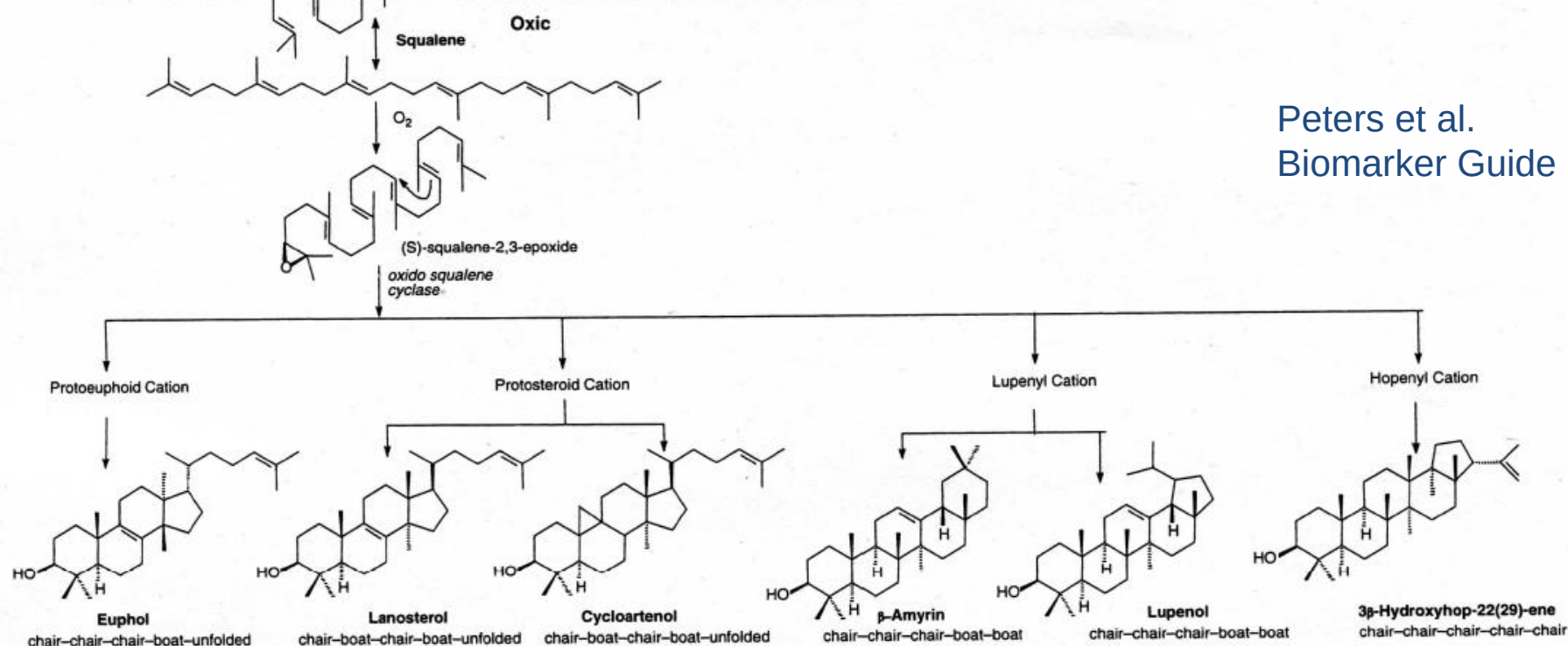


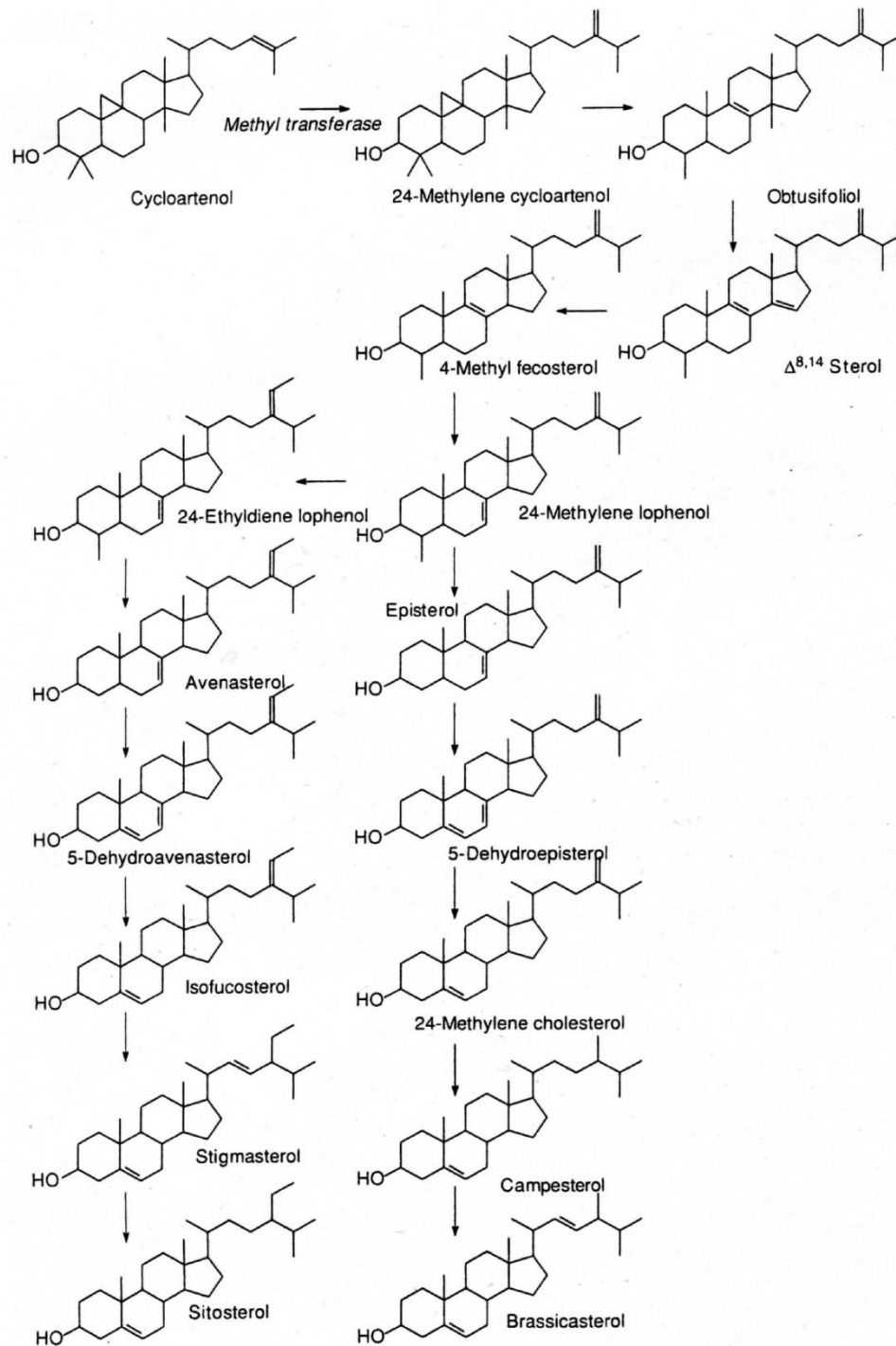


Brocks et al.(2003)
GCA



Peters et al.
Biomarker Guide

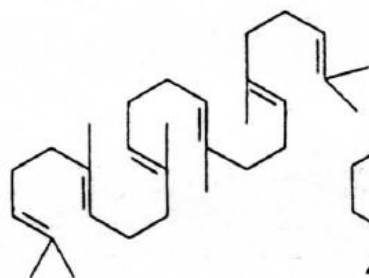




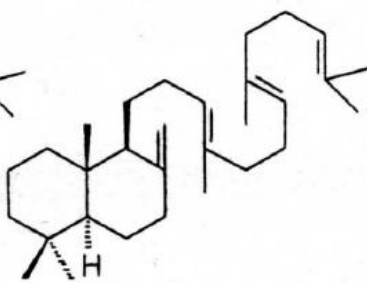
ステロールの 生合成系

Peters et al.
Biomarker Guide

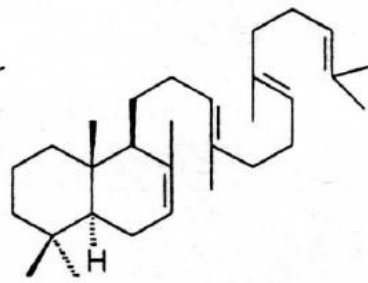




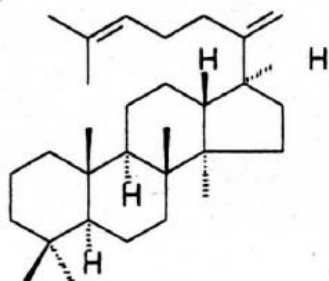
squalene



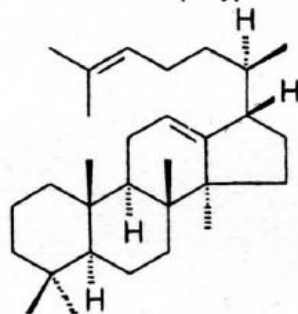
K-polypodatetraene



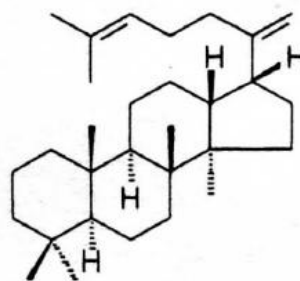
Q-polypodatetraene



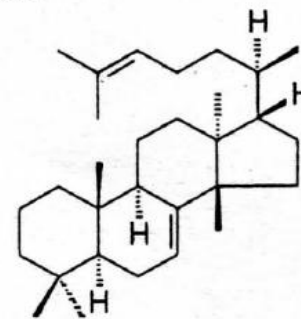
dammara-20(21),24-diene



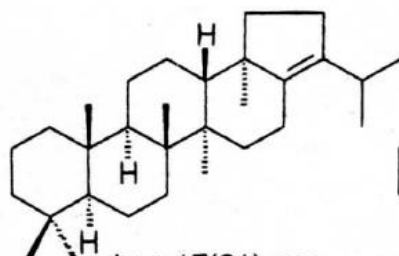
17-isodammara-12,24-diene



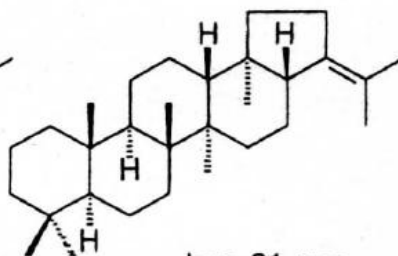
17-isodammara-20(21),24-diene



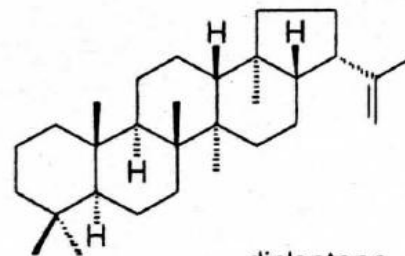
eupa-7,24-diene



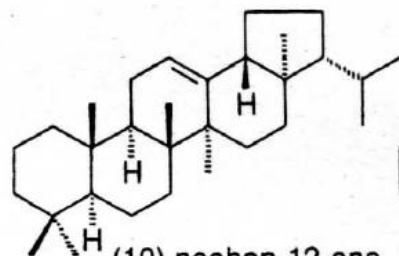
hop-17(21)-ene



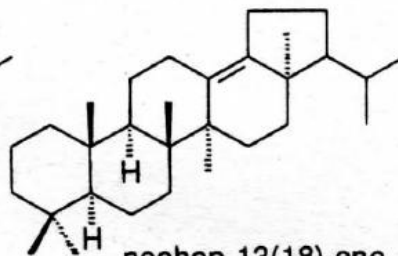
hop-21-ene



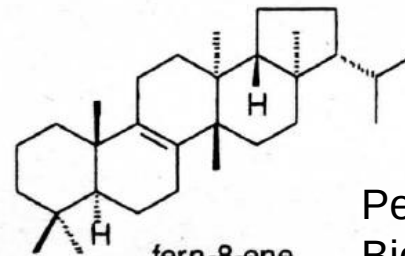
diploptene



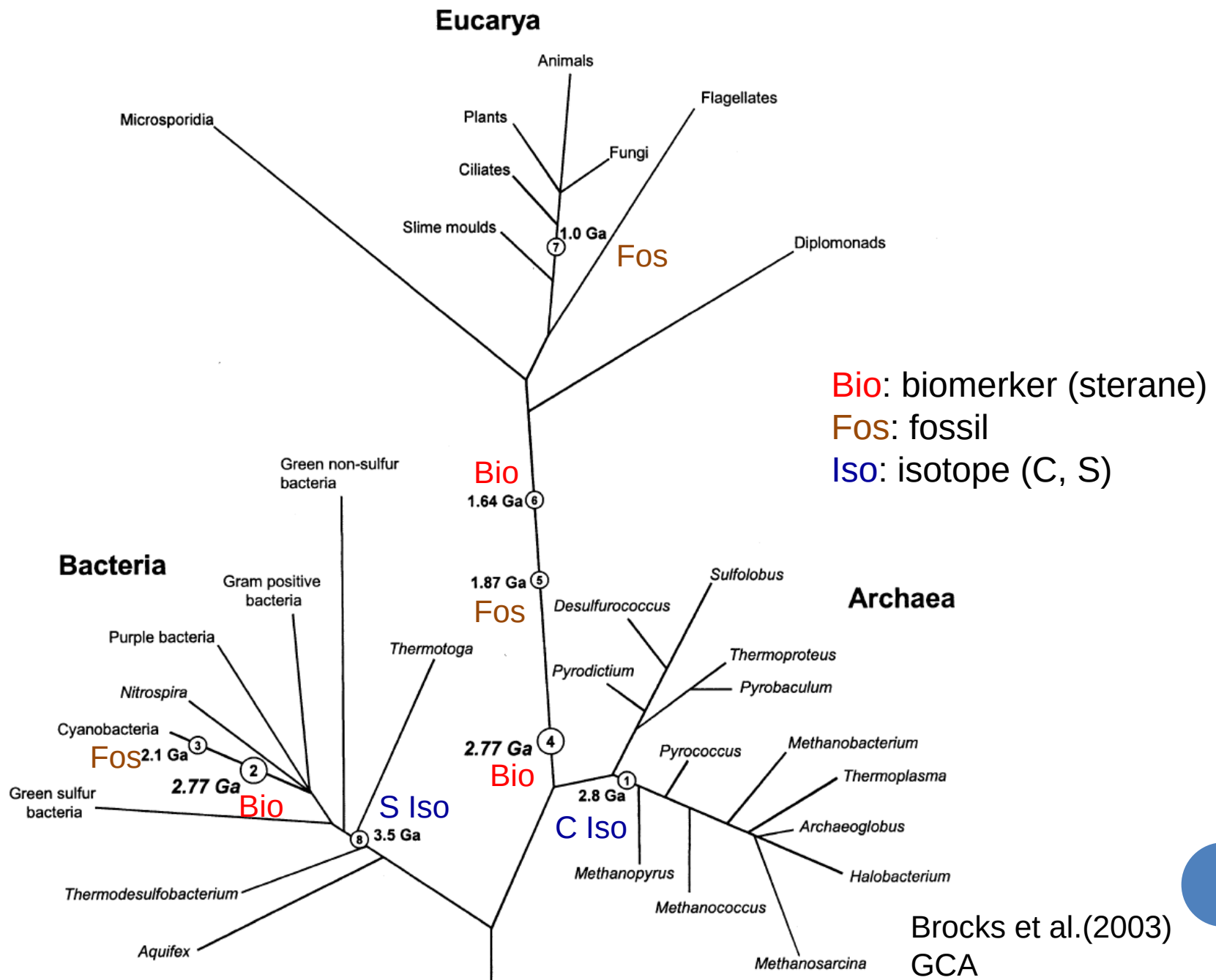
(10) neohop-12-ene



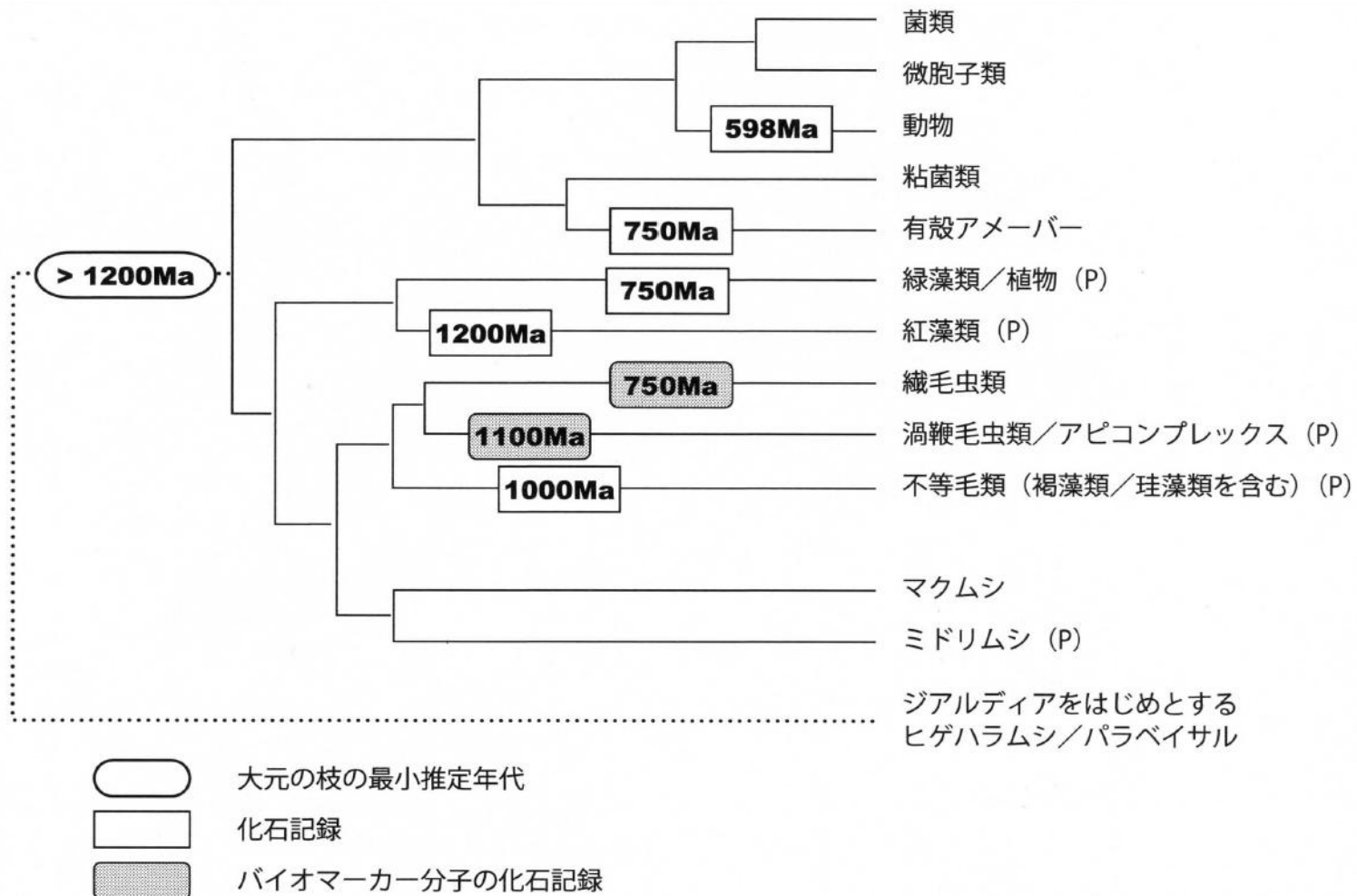
neohop-13(18)-ene



fern-8-ene



Brocks et al.(2003)
GCA



生物の出現の推定年代(川幡穂高, 2011)Knoll(2003)に基づく。

参考文献1

- 角皆静男, 乗木新一郎, 1983: 海洋化学 -化学で海を解く-, 産業図書, pp.286
- 沢田 健, 西 弘嗣, 枋内 新, 馬渡 峻輔, 綿貫 豊, 秋元 信一, 阿波根 直一, 大原 昌宏, 柁原 宏, 片倉 春雄, 倉本 圭, 小林 快次, 鈴木 徳行, 高橋 英樹, 堀口 健雄, 前川 光司, 増田 道夫, 増田 隆一, 2008 :地球と生命の進化学, 北海道大学出版会, pp.272
- J. W. Schopf, 1993 : Microfossils of the early archean apex chert - New evidence of the antiquity of life, Science, 260, 640-646
- T. M. Han, B. Runneger, 1992: Megascopic eukaryotic algae from the 2.1 billion-year-old Negaunee Iron-Formation, Michigan., Science, 257, 232-235
- A. H. Knoll, 1994: Proterozoic and early Cambrian protists: evidence for accelerating evolutionary tempo, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 91, 6743-6750
- J. J. Brocks, G. A. Logan, R. Buick, R. E. Summons, 1999: Archean molecular fossils and the early rise of eukaryotes, Science, 285, 1033-1036
- Manfred Schidlowski, 1988: A 3,800-million-year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks. , Nature, 333, 313-318
- S. J. Mojzsis, G. Arrhenius, K. D. McKeegan, T. M. Harrison, A. P. Nutman, C. R. L. Friend, 1996: Evidence for life on Earth before 3,800 million years ago. Nature, 384, 55-59
- 川幡穂高, 2011: 地球表層環境の進化 -先カンブリア時代から近未来まで, 東京大学出版会, pp. 292

参考文献2

- M. D. Brasier, O.R. Green, A. P. Jephcoat, A. K. Kleppe, M. J. Van Kranendonk, J. F. Lindsay, A. Steele, N. V. Grassineau, 2002: Questioning the evidence for Earth's oldest fossils, *Nature*, 416, 76-81
- C. M. Fedo, M. J. Whitehouse, 2002: Metasomatic origin of quartz-pyroxene rock, Akilia, Greenland, and implications for Earth's earliest life, *Science*, 296, 1448-1452
- M. T. Rosing, 1999: C-13-depleted carbon microparticles in > 3700-Ma sea-floor sedimentary rocks from west Greenland, *Science*, 283, 674-676
- Michael Crichton: ジュラシック・パーク〈上〉, ハヤカワ文庫NV
- 久慈琥珀記念館: <http://www.kuji.co.jp/museum/>
- R. J. Cano, H. N. Poinar, N. J. Pieniazek, A. Acra, G. O. Poinar, 1993: Amplification and sequencing of DNA from a 120-135-million-year-old weevil, *Nature*, 363, 536-538
- Hendrik N. Poinar, Raul J. Cano & George O. Poinar Jr, 1993: DNA from an extinct plant, *Nature*, 363, 677
- K. Sawada, 2006: Organic facies and geochemical aspects in Neogene neritic sediments of the Takafu syncline area of central Japan: Paleoenvironmental and sedimentological reconstructions, *Island arc*, 15, 517-536
- B. P. Tissot, D. H. Wette, 1984: *Petroleum Formation and Occurrence*, Springer-Verlag, pp.698

参考文献3

- E. W. Tegelaar, R. M. Matthezing, J. B. H. Jansen, B. Horsfield, J. W. Deleeuw, 1989: Possible origin of normal – alkanes in high – wax crude oils, *Nature*, 342, 529-531
- S. C. Xie, R. D. Pancost, H. F. Yin, H. M. Wang, R. P. Evershed, 2005: Two episodes of microbial change coupled with Permo/Triassic faunal mass extinction , *Nature*, 434, 494-497
- K. E. Peters, C. C. Walters, J. M. Moldowan, 2005: The Biomarker Guide, Volume 1: Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History, Cambridge
- JAMSTEC: <http://www.jamstec.go.jp/j/>
- Jacob. R. Waldbauer, Laura. S. Sherman, Dawn Y. Sumner, Roger E. Summons, 2009: Archean molecular fossils from the Transvaal Supergroup record the antiquity of microbial diversity and aerobiosis, *Precambrian Research* , 169, 28-47
- A. Vairavamurthy, K. Mopper, 1987: Geochemical formation of organosulfur compounds (thiols) by addition of H_2S to sedimentary organic – matter, *Nature*, 329, 623-625
- M. E. L. Kohnen, J. S. S. Damste, H. L. Tenhaven, J. W. Deleeuw, 1989: Early incorporation of polysulfides in sedimentary organic – matter, *Nature*, 341, 640-641

参考文献4

- M. E. L. Kohnen, S. Schouten, 1992: Recognition of paleobiochemicals by a combined molecular sulfur and isotope geochemical approach, *Science*, 256, 358-362
- 北海道大学理学研究院生物地球化学研究室
: <http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~mmgc/>
- S. Schouten, J. P. Bowman, W. I. C. Rijpstra, J. S. S. Damste, 1992 :Sterols in a psychrophilic methanotroph, *Methylosphaera hansonii*, *FEMS Microbiology Letters*, 186, 193-195
- T. Hai, B. Schneider, J. Schmidt, G. Adam, 1996: Sterols and triterpenoids from the cyanobacterium *Anabaena hallensis*, *Phytochemistry*, 41, 1083-1084
- J. J. Brocks, R. Buick, R. E. Summons, G. A. Logan, 2003a: A reconstruction of Archean diversity based on molecular fossils from the 2.78 to 2.45 billion-year-old Mount Bruce Supergroup, Hamersley Basin, Western Australia: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67, 4321-4335
- A. H. Knoll, 2003: Biomineralization and evolutionary history, *Biomineralization*, 54, 329-356
- Brasier et al.(2003)

