

海底熱水系に堆積する有機物の地球化学

山中 寿朗*¹

深海底の熱水活動域には化学合成生物群集の大きなバイオマスが存在する。すなわち化学合成バクテリアによる多量の一次生産が熱水活動域で行われている。生産された有機物の一部は海底に堆積物として沈殿する。バクテリアによる一次生産に限らず、有光層や陸上からも有機物が海底に運搬され堆積している。堆積有機化合物の分析から、有機物の供給源や起源生物、食物連鎖、バイオマスといった情報を読みとることができる。起源生物指標有機化合物（バイオマーカー）を用いた研究は海底熱水系でも有効である。

また、熱水活動による堆積有機物の変質も、炭素循環や石油生成と関連して重要な研究課題である。海底熱水活動に関する無機地球化学的な研究は近年多くの成果を取っているが、有機地球化学的成果は数少ない。そこで本論文では堆積有機物分析の手法を簡単に紹介し、今後、海底熱水系での有機地球化学的研究に期待される成果について解説する。

キーワード：海底熱水系、堆積有機物、有機地球化学、バイオマーカー、熱水変質

Geochemistry of sedimentary organic matter at hydrothermal systems

Toshiro YAMANAKA*²

Around hydrothermal fields at deep sea-floor large biomass can be observed. There are primary input produced by chemoautosynthetic bacteria. Some organic matter provided from them are accumulated on the sea-floor. Organic matters are provided not only from bacteria but from upper water column and land mass. Analyses of organic matters give many information such as the origin, source organisms, food chain, and biomass. The investigations using biomarkers, such compounds indicated source organisms, show the microflora changes with the evolution of hydrothermal systems. The fate and alterations of organic matters under hydrothermal conditions are also important subjects link with carbon cycle and hydrothermal petroleum generation. Inorganic geochemical approach for hydrothermal systems provides us many results such as magnesium flux, however, organic geochemical studies are not so much. In this paper, I will expound what investigations are expected from organic geochemical study of sea-floor hydrothermal systems.

Keywords : sea-floor hydrothermal system, sedimentary organic matter, organic geochemistry, biomarker, hydrothermal alteration

* 1 九州大学大学院理学研究科

* 2 Graduate school of Science, Kyushu University

1. はじめに

砕屑物とともに海底に堆積している有機物の研究は、分析機器の発展や新たな技術の開発に伴い近年飛躍的に進展した。特に未固結の堆積物、すなわち、比較的近い過去に堆積した有機物については組成変化が少なく、多くの情報をもたらす。近年の精力的な研究により、ある生物に固有で、その死後も堆積物中にしばらく保存される有機化合物、すなわちバイオマーカーとして利用可能な化合物種も飛躍的に増加した。また、特定の生物が作る数種の有機化合物の組成から、生息時の水温が推定できたり (Brassel et al., 1986)、堆積物中の酸化還元状態までもが推測が可能となった (Didyk et al., 1978)。有機物の炭素や水素、窒素同位体比にまで分析を拡大すると、得られる情報はさらに増加する。海底熱水活動域で有機物分析に期待される成果は、バイオマーカーを用いた生物構成の推定と、バイオマスの見積もりがまず挙げられる。次に、一次生産の炭素源の特定や食物連鎖の推定も期待される成果である。カリフォルニア湾のワイマス海盆では熱水活動に伴って石油が急速に生成する現象が発見された (Simoneit and Lonsdale, 1982)。この現象は有機物の豊富な堆積物に覆われた数カ所の熱水活動域で見ることが出来る (Simoneit, 1993)。熱水活動域での石油生成は化学合成生物群集と並び、熱水系や地球規模での炭素の循環やフラックスを研究する上で無視できない重要な課題である。

さらに、海底熱水噴出孔周辺は地球史における初期生命の発生、進化の場所と考える研究者も多い (例えば Corliss et al., 1981)。最初の生命はバクテリア様の微生物であったと考えられるので、バイオマーカーによる探索が期待されている。最も原始的な生命を起源に持つと考えられている古細菌のうち、超好熱性古細菌は中でも最も原始的だと考えられている。陸上の温泉では超好熱性古細菌のバイオマーカーの探索が行われているが、海底熱水系での研究はほとんど行われていない。

以上のように、海底熱水活動域での堆積有機物の研究は今後さらに必要性が高まると考えられる。本論文では有機物分析で一般的に用いられる分析手法やサンプルの処理法を紹介し、今後期待される研究成果について解説する。

2. 試料採取及び採取後の処理

「しんかい2000」、「同6500」や「ドルフィン3K」システムによる深海底からの堆積物の採集は、船上から行うドレッジやピストンコアによる採集と異なり、熱水によ

る変色域などのまさに熱水の影響下にある堆積物が得られる。一般に熱水活動域は火山活動の盛んな場所に伴うため、海底面には比較的新しい火山噴出物や溶岩などが露岩しており、泥質の堆積物は少ない。熱水活動域周辺で硫酸細菌と共生することで生きているシロウリガイは、その生息が底質に強く規制され、殻長が半分以上砂や泥に埋まることのできる場所にのみ認められる。熱水から供給されるエネルギー源も必要であるから、シロウリガイコロニーがある場所からは熱水影響下にある十分量の堆積物試料を得ることが出来る。また、沖縄トラフのような、大陸から多量の堆積物が供給される海底では熱水活動域が厚く堆積物で覆われており、やはり堆積物採集が容易である。堆積物試料は通常、プッシュコアや熊手、時に東大海洋研式のM型採泥器で採集する。

採集された堆積物試料は、速やかに冷凍保存することが望ましい。コア試料の場合、深さ方向に薄く切り分けて組成変化を時系列的に追跡することも可能である。特に、バイオマーカーを用いた生物組成の研究には1cm以下の厚さに切り分けて分析することも有効である。ただし、石油生成を見るのであれば酸化的な表層部とそれ以下の部分の2層に分けるだけで十分である。

ガソリン臭を放つ堆積物が採集され、石油生成が予想される場合、通常多くの揮発性炭化水素を含んでいる。揮発性成分を分析する場合は採集後直ちにステンレス缶などに封かんし、微生物活性を抑えるように冷凍することが望ましい。具体的な方法はSimoneit et al. (1979)を参照されたい。

3. 分析方法

堆積物中の有機物を分析するためにはまず堆積物から有機物を抽出する。抽出を行う前に堆積物を凍結乾燥することもある。抽出には一般に極性の異なる複数の有機溶媒を混合して用いる。抽出法にはソックスレー抽出や超音波抽出、振とうによる抽出などがある。堆積有機物の一部は、高分子有機化合物に結合していたり、菌体の細胞壁など有機溶媒によって容易に抽出できないものもある。これらを分析対象とする場合は、抽出前にアルカリ加水分解を行う。

抽出された有機物には多種多様なものが含まれるが、すべてを分析するのは困難である。分析対象とする有機物がはっきりと決まっていれば、抽出後、カラムクロマトグラフィーなどの手法で各有機化合物に分離する。加水分解を行った場合は、有機物は水溶液となっているので有機溶媒により再抽出を行うが、その際、

酸性と中〜アルカリ性の2つの分画に分けられる。前者の主成分は脂肪酸であり後者には炭化水素やアルコールが含まれる。炭化水素はカラムクロマトグラフィーにより脂肪族炭化水素、芳香族炭化水素、ケトンなどに分けられる。

各有機化合物の同定は、ガスクロマトグラフィー(GC)による保持時間やガスクロマトグラフィーと組み合わせた質量分析計(GC/MS)で得られるマススペクトルによる方法が一般的である。例えばバイオマーカーとしてよく用いられる脂肪酸の場合、標品が多く市販されているためガスクロマトグラフィーによる比較により容易に同定できる。ただし、分離に用いるカラムの能力により、複数の化合物が分離されずに同一ピーク中に現れる場合もあることに注意しなければならない。最終的にはGC/MS分析を行い、マススペクトルによる同定を行うことが望ましい。

炭素やその他の元素の安定同位体比も有機地球化学的に重要な情報となる。バイオマーカーを見る場合も石油を見る場合も炭素などの同位体比を測定しておくことで様々な議論に対応できる。既に良く知られていることであるが、生物体の炭素同位体比は、その生物が食べている栄養源の炭素同位体比に強く影響される。近年、ガスクロマトグラフィーと安定同位体比用の質量分析計を組み合わせることにより分子レベルの炭素同位体比の測定が可能となった(GC/C/MS, GC/IRMSなどと呼ばれる)。日本でも既に10台以上の装置が導入され様々な試みが行われている(例えば坂田・金子, 1995)。

最後に、熱水活動域から得られた試料を分析する上で注意することは、大量の硫黄が堆積物に含まれていることが多い点である。硫黄の結晶など単体硫黄は有機溶媒に非常によく溶ける。少量の硫黄であればGCによりピークとして分離することもあるが、量が多いと有機化合物の定量や定性に支障が生じる。溶媒を除去した後の抽出有機物中に再結晶するほどの量の硫黄が含まれる場合、硫黄を除去しておくことが望ましい。一般に還元銅のカラムを通して硫黄を除去する(Blumer, 1957)。ただしこの場合、含硫黄有機化合物の一部も除去される可能性もある。

4. 分析結果の検討及び期待される成果

4.1 バイオマーカーを用いた研究

GCやGC/MS分析により得られたクロマトグラム上にピークとして分離された化合物は、そのピークの面積をほぼその化合物の相対量と考える。正確な濃度を知

るためには、外部標準や内部標準を用いてピークの面積より概算する。また、脂肪酸の脂肪酸鎖中にある不飽和結合の数や、メチル分岐の位置及び数などから、およそその生物構成が推定可能で、図1のようなグラフを作成すると生態系の違いが比較しやすい。具体的には不飽和を一つ含むモノ不飽和脂肪酸は好気性バクテリアに多く、イソ及びアンティソの構造を持つメチル分岐脂肪酸は硫酸還元細菌などの嫌気性バクテリアのバイオマーカーである(図2)。多不飽和脂肪酸は珪藻などの高等生物に多く(例えばVolkman et al., 1981)、炭素数が20を越える高分子の直鎖飽和脂肪酸は陸上の高等植物(草や木)に由来する(Nichols and Johns, 1985; Bianchi et al., 1989)。得られた脂肪酸組成については多変量解析により類似度を計算することで定量的な比較が可能である(Rajendran et al., 1992)。

バイオマーカーを用いた研究は上で説明したように堆積物表層の生物構成を知る目的で非常に有用である。例えば長沼ら(1997)は、化学合成生物群集の一つである鳥島鯨骨動物群集をヒントに、深海底に有機物塊(豚頭)を置き、周辺堆積物の脂肪酸バイオマーカー組成の変化を追跡することから生態系の移り変わりを見だしている。具体的には、有効な脂肪酸バイオマーカーを十数から数十種選び、その組成の類似度を計算しクラスター分析を行ってデンドログラムを作成する。同様の研究は熱水活動の進化と生物構成の変化を見るのにも適していると考えられ、バイオマーカーから過去の熱水活動の様子を復元できるかもしれない。

脂肪酸濃度はバイオマスの推定にも有効である(Rajendran et al., 1992)。パプアニューギニア・マヌス海盆の海底熱水系における堆積有機物中の脂肪酸分析結果では通常海盆よりも高い脂肪酸濃度が報告され、脂肪酸組成も好気性バクテリア由来のモノ不飽和脂肪酸に富んでいた(石橋ら, 1997)。このことから、熱水活動域では硫酸還元細菌などによるその場での一次生産が非常に高いと見なせる。熱水活動域のバイオマスやそこに生息する生物がどの程度化学合成バクテリアに依存しているか具体的なデータは極めて稀である。今後さらに多くのデータの収集が望まれる。さらに、海底熱水系では高温の熱水が湧出していることから、好熱性細菌、特に好熱性古細菌の存在が期待される。熱水試料を用いた単離・培養実験より海底熱水噴出孔にも超好熱性古細菌の存在が指摘されている(例えばゴンザレスら, 1994)が、バイオマーカーからの確認は皆無である。古細菌の特徴は膜脂質がエーテル結合したイソプレノイド側鎖を持つ

点で、これはバイオマーカーとしても有効である。海底熱水活動域での古細菌の探索はあまり行われておらず、今後発展の期待される分野でもある。また、陸上の温泉から単離した古細菌について、培養温度を変化させるとイソプレノイド側鎖の一部が環化し、その割合が変化する (DeRosa et al., 1980)。これらの研究が進むと有機地球化学的手法により堆積有機物から過去の熱水活動の温度に関する情報も推定が可能になるかもしれない。

バイオマーカーを用いた研究を行う上で注意しなければならない点もある。バイオマーカーは、ある生物が特

定の有機化合物を作る点を利用している。しかし、その逆は必ずしも成り立たない。つまり、ある有機化合物の存在は必ずしも特定の生物の存在を示すとは限らない。時に脂肪酸バイオマーカーは研究室で培養された生物の分析結果から見いだされるが、その生物が自然界では同じ化合物を生成しない事例も知られている (Carpenter et al., 1997)。バイオマーカーは大まかな生態系を知る目的では有効であるが、その利用には十分な注意が必要である。

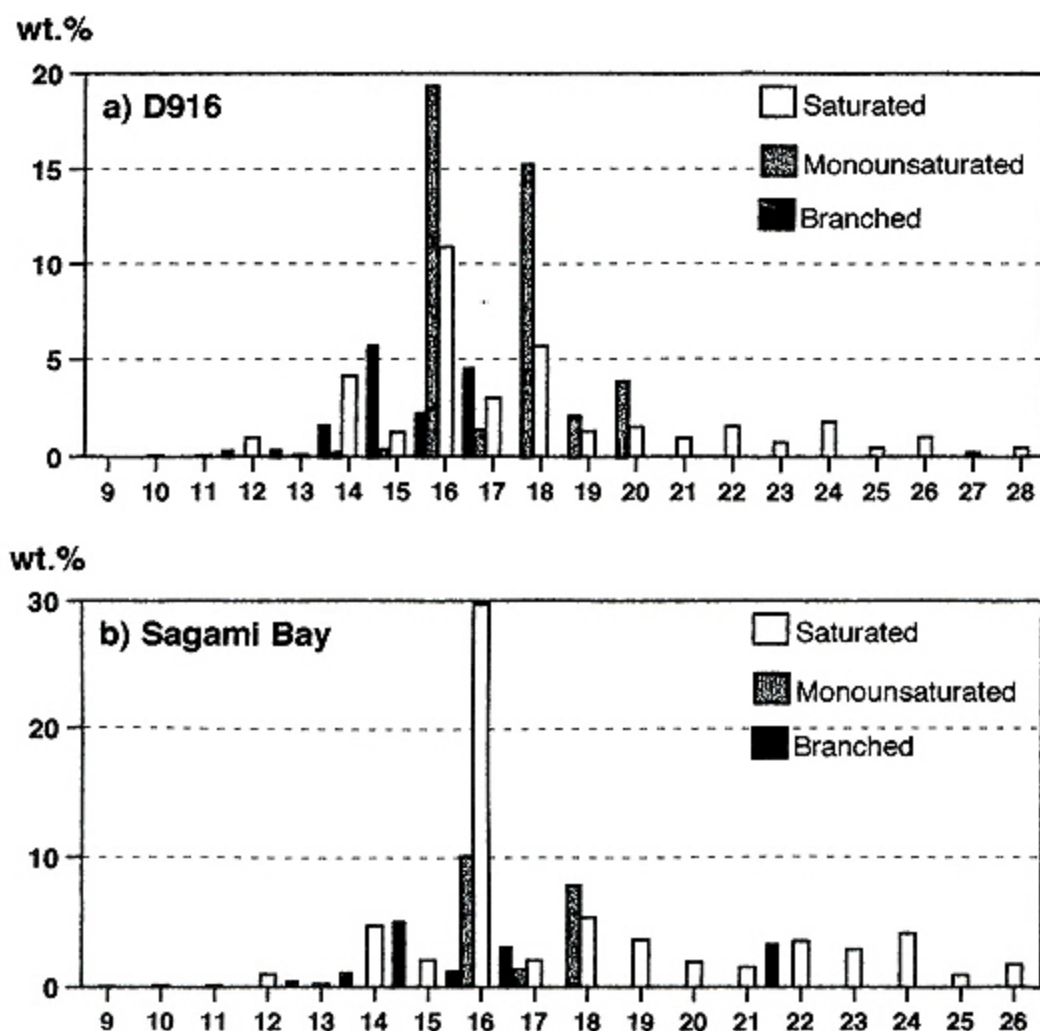


図1 堆積物中の脂肪酸分布 全脂肪酸に対する各脂肪酸（直鎖飽和、モノ不飽和、分岐脂肪酸）の割合を重量パーセントで表した。横軸の数字は脂肪酸分子の炭素数を表す。a) しんかい2000の第916潜行で採取されたマヌス海盆海底熱水活動域のシロウリガイ群集周辺の堆積物、b) 相模湾の海底（深度1,443m）から得られた採取された未攪乱中層堆積物試料（表層3cm）。標準的な海底堆積物中の脂肪酸分布の一例と考えられる。（石橋ら, 1997）

Fig. 1 Fatty acid composition of sediment Bars indicate weight % of individual fatty acid relative to total fatty acid concentration. Numbers on x-axis represent carbon chain length. a) sediment in the vicinity of Calyptogena community, collected during Dive916 of "Sinkai2000" from the hydrothermal field of Manus Basin. b) undisturbed sediment (top 3cm of the core sample) in Sagami bay (depth=1,443m). (Ishibashi et al., 1997)

4.2 熱水による有機物の変質 特に石油生成について

炭化水素については、産業革命以来爆発的に増加した石油燃料の消費により、近年、海岸線に近い海底堆積物はほぼ間違いなく石油による汚染を受けている。石油汚染の指標としてよく議論されるのは炭化水素分画のガスクロマトグラムにベースラインのハンプ、UCM (unresolved complex mixture) が認められるか否かである (Killops and Killops, 1993)。石油中には分岐した炭化水素や様々な位置に二重結合を持つ炭化水素が複雑に分布するためガスクロマトグラフィーで十分に分離できずにベースラインのハンプとなって現れる。もちろん、熱水系で石油が生成されている場合もこの UCM は認められる。そこで、クロマトグラムのハンプが汚染か否か決めるための最も簡単な方法は熱水の影響を受けてない隣接した堆積物を採集しておき、その試料の分析結果と比較することである。それが不可能な場合、現在生産中の石油の有機地球化学的性質 (炭素同位体やバイオマーカーによる熟成度など) と比較する。日本の場合、中東から大部分の石油を購入しているため、日本近海の試料では中東の石油の特徴と比較すれば汚染か否か明らかになる。

ガソリン臭がするなど石油の含有が明らかな場合、通常の石油化学的なバイオマーカーや熟成度指標から石油の熟成度を測る (表)。通常はステランとホパンのエピ化度を用いる (鈴木ら, 1978)。また、脂肪族炭化水素・芳香族炭化水素・アスファルトの相対量を三角ダイアグラムにプロットし、一般的な原油の組成範囲と比較する (図3)。各種多環式芳香族 (PAH) は熱水活動域で特に注目すべき成分である。なぜなら熱分解性多環式芳香

族類 (pyrolytic-PAH) は熱水性の石油中に高濃度で存在する。多環式芳香族には発ガン性を示すものがあり、環境基準が定められているため、各種市販の標品が揃っている。堆積物に覆われた熱水活動域では高温の熱水 (> 300℃) により堆積有機物の変質、すなわち熱分解され急速に石油様の炭化水素に変化する (Simoneit and Lonsdale, 1982)。Simoneit (1993) は熱水活動がおこれば必然的に周囲の堆積有機物は量の多少はあれ石油に変わりうることを指摘している。今のところ、背弧海盆や島弧の熱水活動域から大規模な石油生成は認められていない (わずかに山中ら, 1997; Yamanaka et al., 1998 の報告がある)。しかし、背弧海盆は大陸縁辺にある場合が多いことから、堆積物により拡大軸や海底火山が埋没する可能性が極めて高く、石油生成の可能性が示唆される。例えば今後沖縄トラフなどから石油が発見される可能性を否定できない。採集された堆積物の有機地球化学的な分析は欠かせないであろう。

4.3 炭素同位体比

抽出有機物の炭素同位体のバルク分析から得られる情報は限られている。しかし、分子レベルでの炭素同位体比が測定可能となった今では新たな試みが可能である。陸源の高等植物を示すバイオマーカーの炭素同位体比は海水表層の植物プランクトンのそれより低い (松本ら, 1997)。バクテリアについてはバクテリアそのものの炭素同位体比はほとんど測定の例がない。しかし、各バクテリアのバイオマーカーについて、その炭素同位体比を測定することは可能である。うまく使えば、熱水活動域での食物連鎖を推定する良いデータとなり得る。もちろん、炭素源や栄養源の推定にも非常に有効である。

また、石油の場合、熱分解されて生成する脂肪族炭化水素はそれ以外の有機物より炭素同位体比がわずかに小さい (Simoneit, 1993)。それは質量数が 12 同士の炭素の結合 ($^{12}\text{C}-^{12}\text{C}$) の方が質量数 12 と 13 の炭素の結合 ($^{12}\text{C}-^{13}\text{C}$) より熱によって切断され易いためである。芳香族炭化水素も熱分解の結果生成されることが多いため比較的小さい炭素同位体比を示すと期待され、アスファルトやケロジエンの炭素同位体比は脂肪族や芳香族炭化水素より実際に大きい (Simoneit, 1993)。さらに、石油を栄養源としている生物は石油の炭素同位体比を反映すると期待される。石油生成の顕著な熱水活動域では化学合成バクテリアと石油を食べる生物のどちらが優勢か炭素同位体比から明らかに出来るであろう。

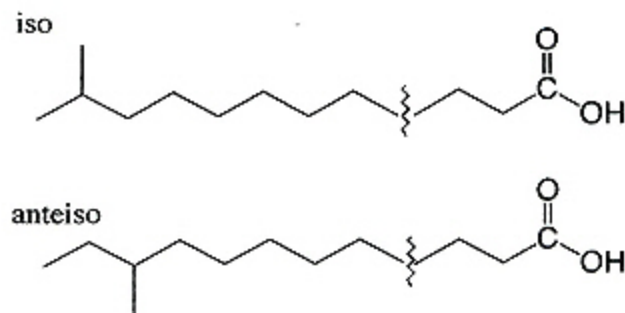


図2 イソ、アンテイソメチル分岐脂肪酸の構造
Fig. 2 Molecular structures of iso, anteiso-form methyl branched fatty acid

対象有機化合物	慣用名	測定方法
全炭化水素	石油化度 (HC/TOC, 炭化水素比)	液体クロマトグラフィー
脂肪族炭化水素	CPI値 n-アルカン/イソプレノイド イソプレノイド異性体組成 メタン炭素同位体組成	ガスクロマトグラフィー 同上 同上 同位体質量分析法
環状炭化水素	ナフテン指標 ステラン20S/(20S+20R) ステラン $\beta\beta/\alpha\alpha$ ジステラン/レギュラーステラン ジステラン異性体組成 ステランL/(L+H) ホバン22S/(22S+22R) ホバン $\beta\alpha/\alpha\beta$ モレタン/ホバン Tm/Ts	ガスクロマトグラフィー ガスクロマトグラフィー質量分析法 同上 同上 同上 同上 同上 同上 同上
芳香族炭化水素	Tri, Mono芳香族ステロイドTA/(TA+MA) Mono芳香族ステロイドL/(L+H) フェナントレンインデックス(PI) メチルフェナントレンインデックス(MPI) フルオレン/メチルビフェニル メチルビフェニル異性体	ガスクロマトグラフィー質量分析法 同上 同上 同上 ガスクロマトグラフィー 同上

表1 抽出有機化合物 (bitumen) の有機成熟度指標 (鈴木, 1993)

Table 1 Organic maturation index of extracted organic compounds (bitumen) (Suzuki, 1993).

5. まとめ

深海底の熱水活動域には化学合成生物群集の巨大なバイオマスが存在する。しかし、その正確なバイオマスの測定や食物連鎖、各生物の栄養源など未だ明らかでない点も多い。さらに、海底熱水活動域の炭素循環がどの程度地球規模の炭素循環に影響しているかといった点も推測の域を出ていない。熱水活動が果たしている地球規模の無機地球化学的な役割は、チムニーなどの活発な熱水噴出地帯よりも、海嶺のスロープで起こっているような熱水のしみ出し程度の活動が規模的に重要であることが指摘されている (Kadko et al., 1995)。生物活動はチムニー周辺だけでなく、海嶺のスロープでも行われているはずであり、そういった場所での生物活動が大きな役割を果たしている可能性もある。早急な課題としては、熱水活動域の一次生産を担っている化学合成細菌のバイオマスの測定や全バイオマスにおける化学合成細菌の寄与の程度を正確に測ることなどが挙げられる。これらの目的を達成するには有機地球化学的なアプ

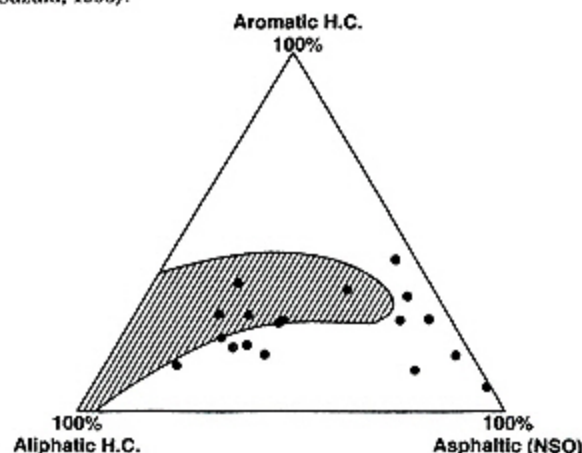


図3 一般的な石油及びワイマス海盆の石油の組成 脂肪族炭化水素、芳香族炭化水素及びアスファルトの相対量。斜線の領域は一般的な原油の組成範囲 (Tissot and Welte, 1984)。黒丸はワイマス海盆の Hydrothermal petroleum の組成 (Simoneit, 1985)。

Fig. 3 Ternary diagram of typical reservoir petroleum and Guaymas Basin hydrothermal petroleum. Relative composition of aliphatics, aromatics and asphaltens. The hatched area indicate typical reservoir petroleum compositions (Tissot and Welte, 1984). The data points indicate the hydrothermal petroleum of Guaymas Basin (Simoneit, 1985).

ローチや遺伝子を用いた分子生物学的な手法が有効であろう。

堆積物に埋没した熱水活動域では海底面下で堆積有機物が熱分解され石油に変わり海底面まで移動してくる。その石油を栄養源とするバイオマスも当然存在し、化学合成生物群集と石油を食べる生物のそれぞれが全バイオマス中でどの程度の比率を占めているか興味深い。熱水活動域におけるバイオマスと石油生成の研究は独立したテーマでなく、互いに関連している点にも考慮すべきである。また、新規地下資源開発の観点からも従来の石油生成論では予測できない、島弧（背弧）のテクトニクスと関連した海底火山や熱水活動域における新たな石油生成現場の発見が期待される。

謝 辞

本論文執筆にあたり、九州大学理学部の北島富美雄博士には論文を査読していただき様々な助言や情報を提供していただいた。記して感謝いたします。

引用文献

- Bianchi, G., Pinarosa, A., Scarpa, O., Murelli, C., Audisio, G. and Rossini, A. (1989): Composition and structure of maize epicuticular wax esters. *Phytochemistry*, 28, 165-171.
- Blumer, M. (1957): Removal of elemental sulfur from hydrocarbon fractions: *Analytical chemistry*, 29, 1039-1041.
- Brassel, 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.
- Carpenter, E. J., Harvey, H. R., Fry, B. and Capone, D. G. (1997): Biogeochemical tracers of the marine cyanobacterium *Trichodesmium*. *Deep-Sea Research I*, 44, 27-38.
- Corliss, J. B., Baross, J. A. and Hoffman, S. E. (1981): "An hypothesis concerning the relationship between submarine hot springs and the origin of life on Earth". P59-69. In: *Proceedings of the 26th International Geological Congress, Oceanol. Acta*.
- DeRosa, M., Esposito, E., Gambacorta, A., Nicolaus, B. and Bu'Lock, J. D. (1980): Effect of temperature on ether lipid composition of *Caldwellia acidophila*. *Phytochemistry*, 19, 827-831.
- Didyk, B. M., Simoneit, B. R. T., Brassell, S. C. and Eglinton, G. (1978): Organic geochemical indicators of paleoenvironmental conditions of sedimentation. *Nature*, 342, 65-69.
- ファン・ゴンザレス・佐藤孝子・加藤千明・堀越弘毅 (1994) : 南西太平洋の熱水鉱床より得られた、熱水サンプルからの超好熱性古細菌の単離とその性質. *JAMSTEC 深海研究*, 10, 471-480.
- 石橋純一郎・山中寿朗・岡村慶・蒲生俊敬・ジャンリュック・シャルー・千葉仁・下島公紀・高橋弘樹・BIOACCESS 航海乗船研究者 (1997) : マヌス海盆デスモス海穴のマグマ性海底熱水活動の地球化学的研究. *JAMSTEC 深海研究*, 14, 243-248.
- Kadko, D., Baross, J. and Alt, J. (1995): "The magnitude and global implications of hydrothermal flux. In: *Seafloor hydrothermal systems*", p446-466. Edited by Humphris, S. E., Zierenberg, R. A., Mullineaux, L. S. and Thomas, R. E., AGU, Washington, DC, 466pp.
- Killops, S. D. and Killops, V. J. (1993): An introduction to organic geochemistry. Longman, New York, 265pp.
- 松本公平・山田桂太・奈良岡浩・石渡良志 (1997) : ガスクロマトグラフィー/質量分析法による堆積物中の個別ステロールの安定炭素同位体分析. *質量分析*, 45, 641-648.
- 長沼毅・服部睦男・秋本和實・門馬大和・橋本惇 (1997) : 海底での有機物分解による冷水型微生物相の形成 —海底比較実験タフノミー (CETUS) へのアプローチ—. *JAMSTEC 深海研究*, 14, 697-709.
- Nichols, P. D. and Patterson, G. W. (1982): Lipid components of the seagrasses *Posidonia australis* and *Heterozostera tasmanica* as indicators of carbon source. *Phytochemistry*, 21, 1613-1621.
- Rajendran, N., Matsuda, O., Imamura, N. and Urushigawa, Y. (1992): Variation in microbial biomass and community structure in sediments of eutrophic bays as determined by phospholipid ester-linked fatty acids. *Appl. Environ. Microbiol.*, 58, 562-571.
- 坂田将・金子信幸 (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測定と地球化学的応用. *地質ニュース*, 487, 45-51.
- Simoneit, B. R. T., Mazurek, M. A., Brenner, S., Crisp, P. T. and Kaplan, I. R. (1979): Organic geochemistry of recent sediments from Guaymas Basin, Gulf of California. *Deep-sea Res.*, 26A, 879-891.

- Simoneit, B. R. T. and Lonsdale, P. F. (1982): Hydrothermal petroleum in mineralized mounds at the seabed of Guaymas Basin. *Nature*, 295, 198-202.
- Simoneit, B. R. T. (1985): Hydrothermal petroleum: genesis, migration, and deposition in Guaymas Basin, Gulf of California. *Can. J. Earth Sci.*, 22, 1919-1929.
- Simoneit, B. R. T. (1993): "Hydrothermal alteration of organic matter in marine and terrestrial systems", p397-418, In: *Organic Geochemistry*, Edited by M. H. Engel and S. A. Macko, Plenum Press, New York, 861pp.
- 鈴木徳行・坂田将・金子信行(1978): バイオマーカー組成からみた新潟堆積盆地新第三系原油, コンデンセート油の熟成度と一次移動の時期, 石技誌, 52, 499-510. 鈴木徳行(1993): "地化学的評価技術", p208-242, In: 最近の我が国の石油開発, 石油技術協会編, 石油技術協会, 東京, 443pp.
- Tissot, B. P. and Welte, D. H. (1984): *Petroleum formation and Occurrence: A new approach to oil and gas exploration*, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin, 699pp.
- 山中寿朗・石橋純一郎・村江達士・BIOACCESS乗船研究者一同(1997): パプアニューギニア・マヌス海盆海底熱水系の堆積有機物の地球科学. 日本地質学会第104年年会講演要旨集, 384.
- Yamanaka, T., Mizota, C., Murae, T. and Hashimoto, J. (1998): A current forming petroleum associated with hydrothermal mineralization and arc tectonics. *Geochemical J.* (to be submitted).
- Volkman, J. K., Smith, D. J., Eglinton, G., Forsberg, T. E. V. and Corner, E. D. S. (1981) Sterol and fatty acid composition of four marine haptophycean algae. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.*, 61, 509-527.

(原稿受理: 1998年7月8日)