

もう一つのヘリウムとメタン(その3)

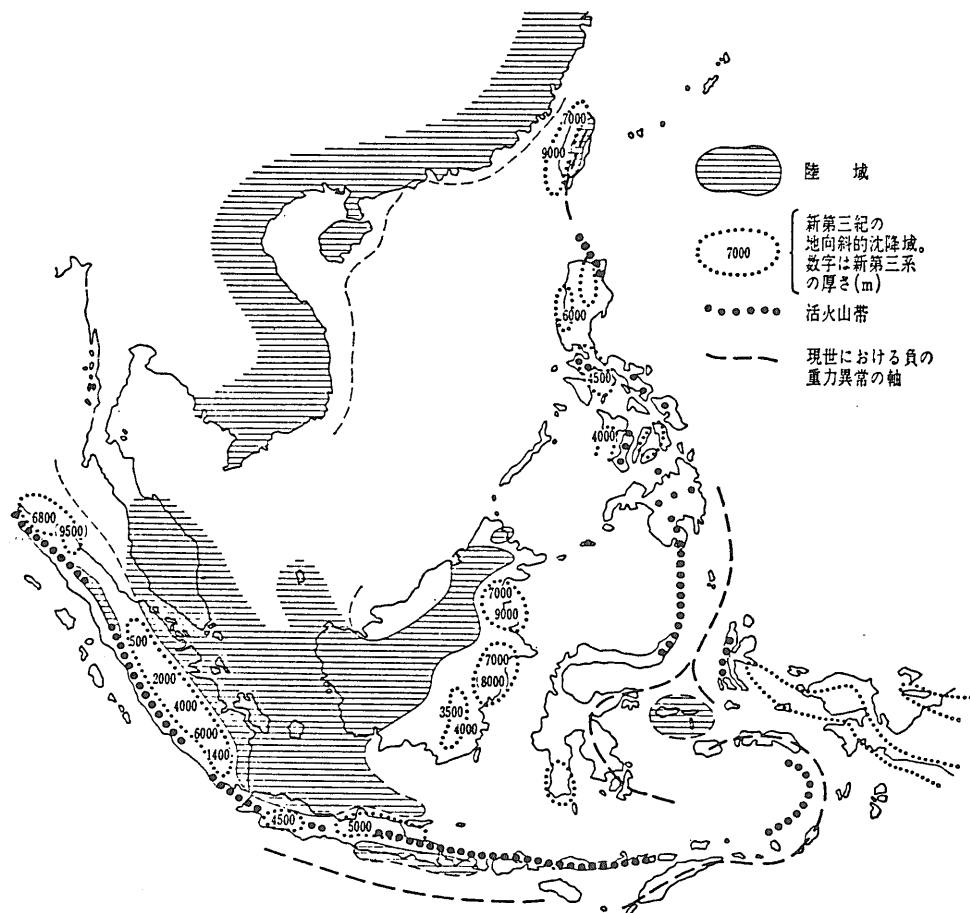
福田 理 (海外地質調査協力室)
Osamu FUKUTA

23 日本以外における上部マントル起源の石油・天然ガス鉱床成立の可能性

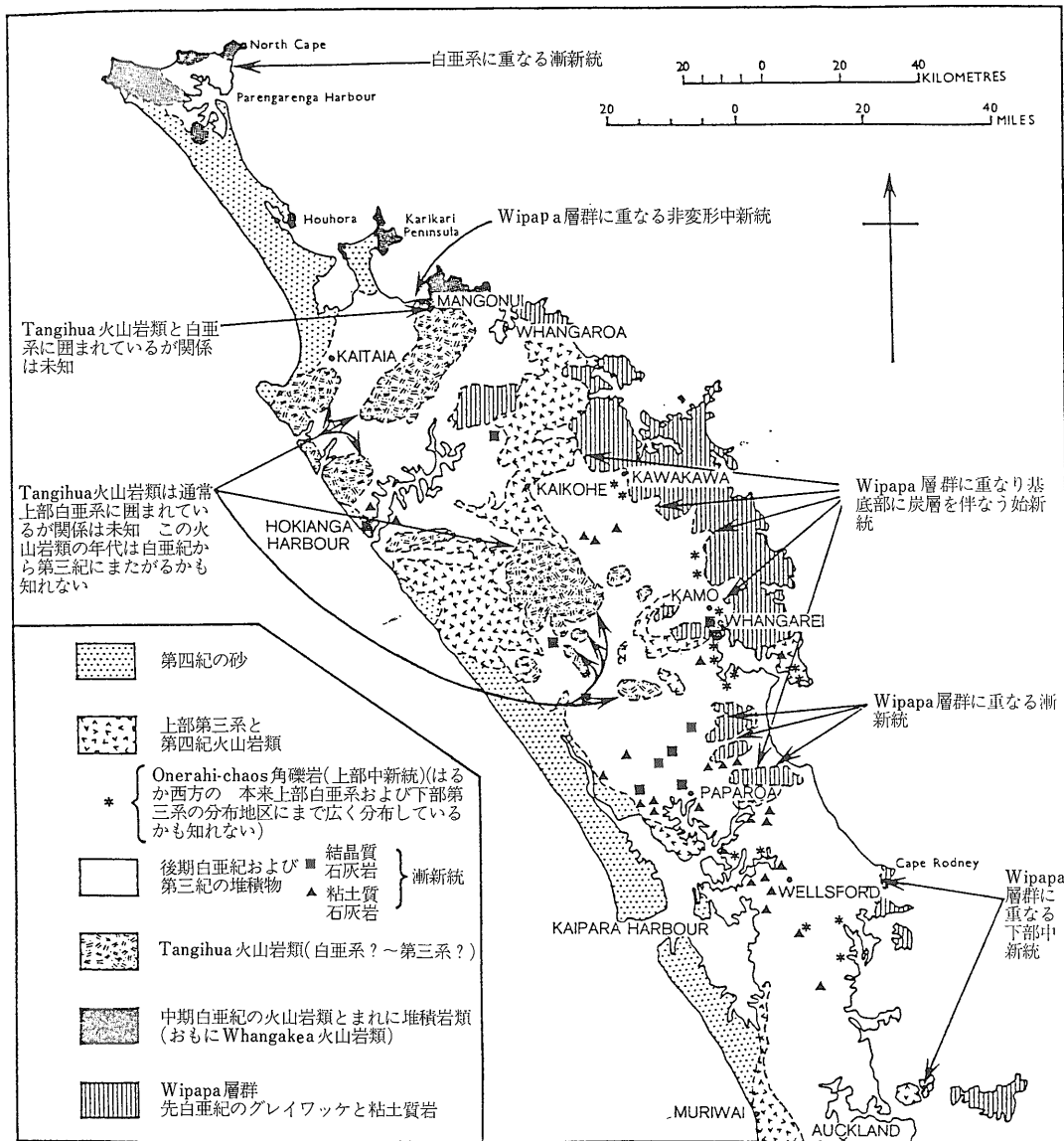
日本の緑色凝灰岩層にみられるような油・ガス層がほかにもあるとすれば その可能性がもっとも高いのは日本と同じような弧状列島であろう。高井・鎮西 (1967) がまとめたところによれば 台湾 フィリピン および東インド諸島 (図32) は 現在の地球物理学的な諸特性だけでなく 激しい火成活動と急速かつ広域な沈降それに続く褶曲と隆起など 新第三紀の地史の特徴も日

本列島によく似ている。

東インド諸島は三疊紀と白亜紀の2回の主要な造山運動によって形成された地質構造の原形の上に——この点も日本列島によく似ている——第三紀以後の変動による新しい構造が重なってできた列島で ここに現在みられる弧状列島としての特性が出現するのは新第三紀以後のことである。東インド諸島はその大半が第三紀以後の地層で被われている。とくに新第三系は分布が広く古第三系はむしろ断片的である。このような高井・鎮西 (1967) によるまとめは 大半が第三紀以後の地層で



第32図 東南アジアの弧状列島 (高井・鎮西 1967)
中新世における海陸分布と 新第三紀の堆積盆地のうちで沈降のとくに著しかった部分を示す (括弧内は古第三系を含めた層厚)



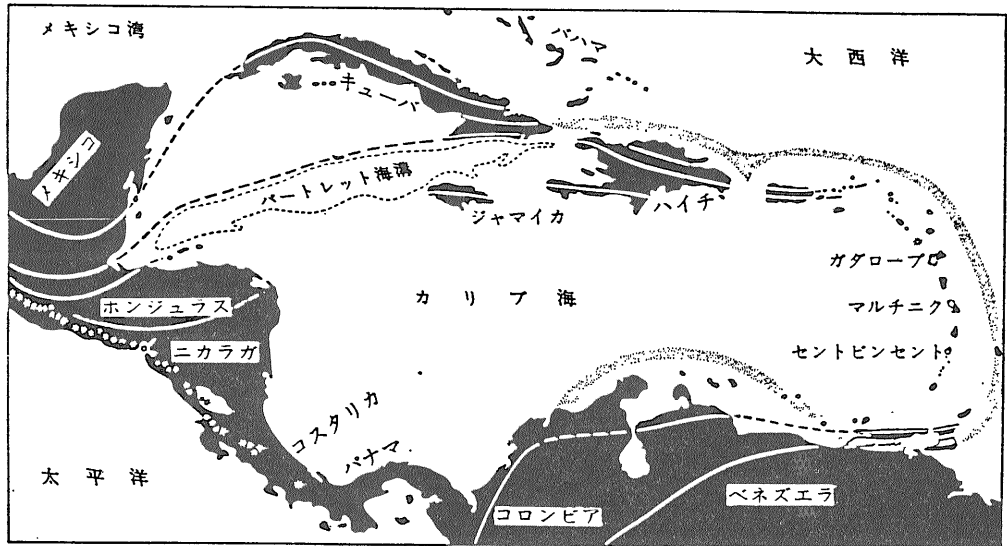
第33図 ノースランドにおける大岩層群の分布 (THOMPSON 1978)

被われているという点を除くと、ほとんどそのまま日本列島にも当てはまる。しかし、日本の緑色凝灰岩層とほぼ時期を同じくする火山岩や火山砕屑層の分布が相当広いのにも拘らず、同じような地質学的性格をもったものは見当たらない。

これより地理的にもまた地質学的にも日本列島に近いのが、千島列島およびアリューシャン列島である。両列島においては第四紀火山の下に火山物質に富み変形した新第三系が分布していて、現在海面下にある部分も含めて、似たような地史をたどったことが推定されている。

ニュージーランドの地質、とくに中生代の中頃以後

の地史は日本のものとよく似ている。白亜紀の中頃の Rangitata 造山と呼ばれる地変はほとんどニュー・ジーランド全土に及んだが、これは日本の佐川造山に当るものである。しかし、新第三紀の初めに大きな火成活動があったのは、北島北部の Northland 地方 (図33) だけである。ニュージーランドのほとんど全域にわたって、漸新世は海侵の絶頂期をもって特徴づけられており、海成の石灰岩が全土にわたってみられる。それに続いて広域にわたる短い堆積の中断があり、再び堆積が始まったのは初期中新世である。この際、南西部で海底火山活動があった。しかし、日本海岸の油・ガス田地



第34図 カリブ海周辺地域の地体構造の概要 (HOLMES 1965; 竹内訳 1969)
 負の重力異常を示すベルト (細点) 造山帯の走向線 (白線および破線) 火山 (白星または黒点)

域にみられるような厚い海成層が その上に発達しているところはない。

少し遠いが 西インド諸島も弧状列島として知られている。図34にみられるように 北側のものは北および中央アメリカのコルジレラから 大アンチレス諸島 (キューバ ハイチなど) を経て バージン群島まで延びている。また 南側のものはアンデスからベネズエラを経てトリニダドに及んでいる。この西インド諸島には各地で新第三系がみられるが いずれも礁石灰岩と泥灰岩を主とし 薄く かつ層序間隙も多い。ここにもわが緑色凝灰岩層のようなものはない。

このように わが国の緑色凝灰岩層は世界的にみてもきわめて特殊なものであるいはわが国だけが本層を媒介として地球深部のメタンの恩恵に浴しているのかも知れない。しかし 脇田・佐野 (1982) によって指摘されたような事実があるとしても 緑色凝灰岩層中のメタンがすべてマントルに由来するものとは著者は考えていないし 従来どおり生物起原と考え易い例も少くないことも忘れないで欲しい。

24 石油・天然ガスの成因に関する二元論と隕石

GOLD & SOTER (1980) は石油の一部も非生物起源のものと考えている。彼等によれば 地球の初源物質ともいうべき隕石中の大部分の炭素は オイル・タールに類似した化学成分をもつ複雑な炭化水素の形をしているのだから このような考えになるのは当然である。彼

等がその論文中の「石油の成因」という節の重要な部分を要約すると 次のようになる。

「控え目に見積っても巨大な封圧によって (地下深所の) メタンは安定な状態におかれ 酸化は妨げられている。かりに岩石が酸化メタンのような形で酸素を含んでいたとしても 酸素が十分な量になり得るのは岩石が流体の状態にある場合だけである。もしガスが連続的に進む通路が固体の岩石中の割れ目だけであれば その出口近くの地表ではすぐに酸素がなくなってしまい 結局ガスは大部分酸化されずに残されることになるだろう。

多くの堆積物にも生物の残留物が豊富に含まれている。このような岩石が下方からの非生物性の石油で侵され 高温高压下で数 100 万年間もそれにひたっていれば きっとこの石油は堆積物からの生物由来の物質 たえばポルフィリンによって汚染されるであろう。

私たちが描いた石油の成因図は二元的なものである。すなわち 地下に埋もれた生物に由来する堆積物からの炭化水素と おそらくはそれよりはるかに多い非生物起原のメタンからのものが加っているという考えである。

メタンは化学的には反応し易くないが 適当な温度 圧力 および微生物活動を含む触媒作用によって原油に重合することも可能であろう。もしこのような過程が生じたら メタンの上昇流はゆっくりではあるが生物系物質の堆積物をふやし さらにそれを石油鉱床にまで増大させていこう。

堆積盆が大きくなればなるほど 上昇メタンの分子はより多くとらえられることになる。このようなメカニ

ズムは 少数の油田だけが 他のものに比べて とくに 巨大な油田になっているかを説明するのに役立つ」

以上の第1段は石油中の生物体残留分子の 第2段は 彼等の二元的成因論の 第3段はメタンから石油ができる過程の そして第4段は巨大油田の説明である。このうち 著者がひっかかるのは3段および4段である。しかし 否定するにせよ また肯定するにせよ 著者は研究の出発点となるべき有機物を含む隕石の試料をもたない。このような隕石のメタンや石油との結びつきに関する研究は 有機地球化学的研究の手法によってある程度進めることができるだろう。研究試料のご提供をいただければ幸せである。

さて GOLD & SOTER (1980) がオイル・タール類似の複雑な炭化水素という漠然とした書き方をしている有機物については もっとはっきりした情報が 大島 (1971) によって紹介されている。それは1969年にオーストラリアの東南部 Murchison に落下したマーチソン隕石に関するものである。それによれば この隕石に約2重量%含まれている有機物を水で抽出し さらに塩酸で加水分解してから分析したところ 非生物的に形成された としか考えられないアミノ酸類 および多種の炭化水素類が検出されたという。そして これらアミノ酸類が加水分解してから検出されている点を重視し 隕石中にはアミノ酸そのものよりは 重合体の形で存在していることを予想させるとも述べている。

このマーチソン隕石の有機物については 最近 新聞情報 (読売新聞 昭和58年8月31日付朝刊 12版 3ページ) ではあるが きわめて興味深いことが報じられている。すなわち 米国メリーランド大学のシル・ポナムベルマ博士は 8月29日 ワシントンで開かれた全米化学学会年次総会で マーチソン隕石から 地球上のすべての生物の遺伝子を構成する5つの基本化学物質を同時に発見した と発表した。同紙によれば 地球外に地球型生物の基本構成要素すべてが存在することが確認されたのは初めてである。この5つの物質は アデニン グアニン シトレン チミン およびウラシルの5つの塩基で これらは遺伝子である DNA および RNA の構成要素である。この2つが合成されれば これらをもとに自己複製が行われて 生命体が生まれる。ポナムベルマ博士は この発見について 「これは地球外の宇宙でも生命が存在しそうだということを示しており 地球上の生命の起原をより明確に理解するのに役立つ」と語った という。同博士の発見は石油・天然ガスの無機起原説と直接つながるものではないが 地球上の生命 ひいては化石燃料との間接的なつながりが考えられるの

で あえて紹介した。

それは別として 地球上の石油・天然ガスに非生物起原のものが含まれているらしい——それだけの場合もある——ことは GOLÉ & SOTER (1980) が考えている以上に確からしいのである。このことをさらに確かなものとする資料としては 1864年にフランスの Orgueil に落下したオルグイユ隕石に関するものがある。これは落下後100年近くも経ってから研究されたため 検出された有機物の一部に汚染によるものも含まれているのではないかという疑問ももたれているが 6重量%程度の有機物が含まれているというだけで 裏付け資料としては十分であろう。しかも 以上に紹介した2つの隕石で代表される 炭素質コンドライト (粒状隕石) は 隕石のなかではもっとも多い種類なのである。

現在の石油・天然ガス地質学で支配的なのは もちろん生物起原説である。将来の石油・天然ガス資源に関する見通しは もちろんこの考えに立脚して想定されている。もし 世界の石油・天然ガス資源の何割かが非生物起原のものであるとすると これまでの多くの学者によるほとんど一致した見積り すなわち世界の石油の究極資源量がおよそ2兆バーレン (約2,857億トン) であるという見積りは かなり控え目なものとなる。このような見積りが過っていた場合 その被害を受け易いのは日本のような非資源国である。1978年に TISSOT & WELTE の有名な教科書が発行されて以来 生物起原説とくにケロゲン (kerogen; 有機溶媒で抽出できない有機物) 起原説に立つ研究は きわめてやり易くなった。しかし 企業における調査・研究はそれでもよいかも知れないが われわれとしては生物起原の炭化水素のほかには非生物起原のそれが有り得ることを常に念頭において研究を進めるべきであろう。それがわが日本のエネルギー事情の緩和ばかりでなく その極度にわるい一部の開発途上国の救済にもつながるかも知れないのである。

25 もう一つのメタンと海外技術協力の具体案

もう一つのヘリウム すなわちヘリウム-3については現在の用途に対応するには核反応を使って人工的に作ればよいから 資源としての問題はほとんどあるまい。しかし もう一つのメタン すなわち非生物起原のマントルに由来するメタン資源を考える上には ヘリウム-3にまで分析の枠をひろげなければならない。ともかく現在非生物起原のメタンとして資源的な意味をもちそうなものが2つあることは確からしい。その1つがわが緑色凝灰岩層中のメタンであり またもう1つはキヴェー湖型ガス鉱床である。ただし 前節で述べたことから

明らかなように 著者がもっている資料では 海外の陸域にわが緑色凝灰岩層と地質学的に同じものはなさそうだし たとえあったとしてもその探鉱は技術的に難しく直接的かつ確実な探鉱技術は確立されていない。

これに対して すでに述べたように キヴー湖型ガス鉱床の探鉱法はすでに確立していると考えてよい。 その際まず対象となるのはアフリカの大地溝帯の諸湖である。 その際 資源がありそうだとすると 領有権問題が起りそうなどころが多いのが気になるが それは棚上げしてここでは純技術的に考えることにしよう。

予察調査としては大地溝内のおもな湖について順次1ないし数点において 試料採取 計測 および分析を行えばよいのであるが 湖内の深度分布の概要が知られている湖水であることが望ましいし その際アルパート湖のように水深が小さく かつ堆積物が厚いものの優先順位は低くなる。 また 開発した際のガスの利用に便利などころの優先順位は高くなる。 こうしてみると ガス鉱床の存在がすでに知られているキヴー湖は別格とすると 新しい火山岩類とも関係の深いケニアの東部地溝の諸湖の優先順位が高くなりそうである。 また昨春放映されたNHKのテレビの映像でみたエチオピアの湖沼の表面から メタンを主成分とするらしい大きなガス泡が湧出していたのを 著者ははっきり記憶しているのでこれらについても調査・研究の必要があろう。

次に 当初どの程度の規模の予察調査になるかについて 当ててみよう。 まず 携行すべき物品のおもなものとしては 次のようなものが考えられる。

光波測距儀	1
六分儀 (予備として)	1
坑底試料採取器	1
ウインチ (ワイヤー2,000m付)	1
膜式ガスメーター	2
メタン計 (干渉計)	2
ガス検知管用ポンプ	2
現場用水分析装置	1
また 必要な人員は次のようになるであろう。	
総括責任者 (地質)	1
測量技術者	2
計測・分析技術者	2

調査日数としては 現地実働日数が長ければそれだけの成果が得られるはずであるが ケニアやエチオピアの諸湖については それぞれ10日もあれば足りるであろう。 しかし現地政府の協同調査・研究者の事前研修期間が必要であれば これについては別途考慮するものとする。

先にキヴー湖は別格としてといったが 本湖について 著者がもっている資料は 鉱量が5,000万トンであること 湖の面積がおよそ2,310km²であり また最大深度が約400mであるという程度である。 このような場合 少しでも資料のあるところから手をつけ その知識をもとにして未知のところの調査・研究に進むのが常道であろう。 これを別格といった理由はここにある。 本湖はかなり大きいので 必要な現地実働日数は30日程度であろう。

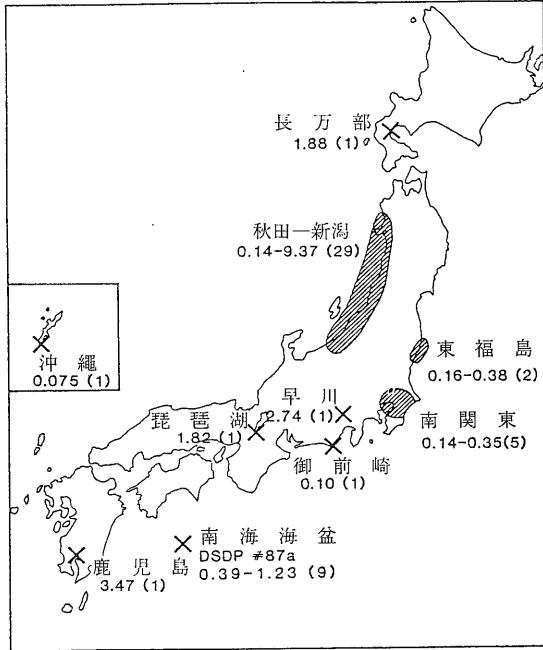
26 む す び

ヘリウム-3およびマントル起原の疑いのあるメタンの国内における研究の現況にはかなり問題がある。 それは一般の分析の設備および研究者の整備されたところにはヘリウム-3の検出に必要な質量分析装置がなく また後者をもっている試験・研究機関は一般分析において欠けるところがあることである。 それはこれまでに印刷または講演された論文の内容についてみれば明らかである。 われわれとしてはぜひ質量分析装置が欲しいといいたいところであるが これはかなり高価なものなのでせめてそれをもっているところとの緊密な協同研究体制だけは何とかして欲しいものである。

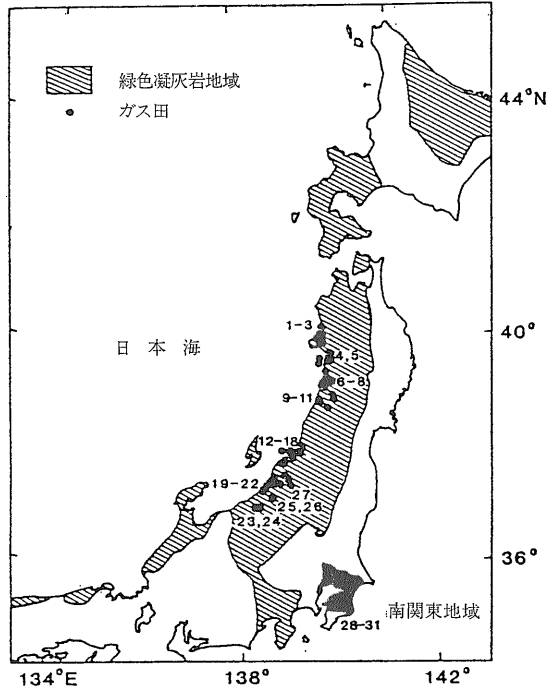
天然ガスについても 2回にわたって述べたように 問題が複雑になってくると 重要性を増すのは何といたっても関係資料の収集である。 しかし 日本を含む自由世界においては 天然ガス鉱業は原則として私企業である。 他の諸鉱業と同様に 天然ガス鉱業も国の手厚い保護・助成を受けているのだから 国の内外において現在生産中の天然ガス試料および今後得られる新しい試料を国に提出する程度の義務を負わせても 自由経済の原則にもとることにはなるまい。 米国はヘリウムに関連してこのような試料の収集・分析に成功している。 国の然るべき機関においてこの試料の分析を実施し 結果はデータ・バンクに保存し 専門家の研究にゆだねるべきであろう。 最後に このようなことも 世界の現状においては 国の安全保証につながることを指摘して 本稿のむすびの言葉とする。

補 遺

本稿脱稿後数ヶ月を経た昭和58年10月17~19日に 八王子市郊外の大学セミナーハウスで行われた日本地球化学会年会においても “もう1つのヘリウムおよびメタン” にかかわる講演がいくつかあった。 なかでも注目されるのは 脇田・佐野・ト部 (1983 講演要旨集279頁) のすばり「メタン系天然ガスの起原」と題する講演であった。 本講演では40もの分析結果が紹介されたがその



第35図 日本のメタンに富む天然ガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比 ($\times 10^{-6}$) (脇田ほか2名1983) 括弧内の数字は試料数



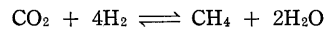
第36図 緑色凝灰岩およびガス田の分布 (WAKITA & SANO 1983) 番号は本文中の試料採取地点を示す。

うち29は日本海沿岸の油・ガス地域産のガスに関するものであった。図35は脇田ら(1983)がメタンに富む天然ガスを採取した地点または地域(括弧内の数字は採取試料数)および $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比($\times 10^{-6}$)を示したものである。それによれば日本海岸の試料は太平洋に面した地域の試料のように大気値よりはるかに低い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を示すものからきわめて高い値のものまであり変動幅は大きい。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の高いガスの貯留層は緑色凝灰岩層に属する。このようなことから脇田らは日本海沿岸のガスを火成(マントル)起原のものと堆積物起原のものとがいろいろな割合で混合したものであろうと結論している。そして講演要旨には明記されていないがマントルにあるのは CO_2 であってそれが上方への移動に際して水素との反応でメタンができるとも述べている。

ところで以上の講演とほぼ同じ内容の論文がWAKITA & SANO (1983)の連名で雑誌“NATURE”の305号(1983年10月27日付)に掲載されている。講演の聞き洩らしや聞き違いがあると困るので上記講演に資料数において劣るが以下この論文に基づいて説明しよう(図36参照)。

ある圧力・温度下においては火山起原の CO_2 と H_2 1984年4月号

の再平衡によって CH_4 が形成される。この



という反応は圧力が増し温度が降下すると右に進行する。KARZHAVIN & VENDILLO (1970 in WAKITA & SANO, 1983)は断層地塊中にとりこまれた流体塊中にみられる高濃度の CH_4 は熱力学的平衡状態にあるマグマ中で生成され得ると説明した。またHALLOWAY (1975 in WAKITA & SANO, 1975)は火山ガス中の実際のガスの動きに基づいて計算し2 kbar 750°Cの条件下で CH_4 濃度が増すことを示した。

以下脇田らの考え方を正しくお伝えするため上記脇田・佐野論文のまとめの部分を抄訳の形で紹介する。

天然ガス中にみられる $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は次のようないろいろな起原をもつ2つのガスの混合によるものであろう：低い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比をもつ純生物起原の CH_4 および火山起原のガスの純粋な非生物学的反応によって形成された高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比をもつ CH_4 。このような場合30%未満の火山起原の CH_4 が生物起原の CH_4 に混入される。生物起原の CH_4 ガスおよびマグマ起原のガスの $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比をそれぞれ 10^{-7} および 10^{-5} としマグマ起原のガスは生物起原のガスの10倍の ^3He を含むと

すると 火山砕屑岩 (緑色凝灰岩) 貯留層にみられる 8.7×10^{-6} という $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比になるような混合比は 1:0.66 と計算される。もし上の考え方が正しいとするとこのような火山砕屑岩中の天然ガスの少くとも3分の1は マグマ起原のものである。中間的な $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比をもつガスは 生物起原およびマグマ起原のガスが いろいろな割合で混合した結果できたものであろう。

それ故 火山砕屑岩貯留層中の CH_4 に富むガスのうちかなりの量が マグマの作用で He とともにマントルからきた。鮮新・更新両世の日本の火山活動は分散的なものだけなので このようなガスとかかわりのあるのは 中期 (くわしくはその初期) 中新世の緑色凝灰岩マグマを想起させる火山活動である。

前期～中期中新世には 東北日本弧の応力場は伸長的なものであった。この伸長応力場は 現在の火山フロントに平行な 南北方向の大規模な地溝の発展の結果できた。伸長的環境のため割れ目が開き また高浸透性をもつようになった。火山砕屑物が噴出し 多くは海面下の凹所に沈積した。続成作用と強い熱水変質のため 火山砕屑物にもともと含まれていたガスは失われたのであろう。火山砕屑物中の高多孔質媒質 および不浸透性帽岩の双方があるところでは ガス田形成が効率的に行われたのであろう。

以上が脇田らの緑色凝灰岩中のガス田形成に関する考え方であるが ここで本誌350号の“ヘリウム資源問題”(その2)のパンハンドル・ガス田の地質を思い出していただきたい。

パンハンドル・ガス田の基盤をなす先カンブリア系は花崗岩 斑岩質流紋岩 および輝緑岩からなる。またその上にのるペンシルヴァニア系の“グラニット・ウォッシュ”は先カンブリア系に由来する全破砕岩片に対する地方的な呼び名である。含ウラン・アスファルト鉱はグラニット・ウォッシュや先カンブリア系の破砕されたところにもある。このような有機物に縁のなさそうなどころにも どうしてアスファルト鉱があるのだろうか。GOLD & SOTER (1980) 説ではメタンが重合をくり返して石油をはじめとする重炭化水素になるとしている (図37)。また パンハンドル・ガス田におけるアスファルト鉱については PIERCE et al. (1964) は 有機物がアスファルト鉱になるのは ウランおよびその娘原子の崩壊に伴う放射能による重合および脱水素の結果であると述べている。彼らはアルファルト鉱のもとになった有機物は石油であったと考えているようである。一方現在の石油生物起原説の主流となっているのは 生物起原のケロゲン (複雑な不溶性有機物) の炭素数が減る過程のなかで 石油やメタンができた (図38) とする考

えである。また 脇田ら (1982, 1983) は石油の成因にはとくに言及していない。以上に述べたように パンハンドル・ガス田のアスファルト鉱の成因についてはいまのところよくわからないといわざるを得ない。

ここでもう1度想起していただきたいのは GOLD & SOTER (1980) も言及しているように 隕石のなかにタール状の有機物を含むものがある ということである。このようなものを含む隕石ないし隕石類似のものが集って地球となったとすると このようなタール状物質から今日地球上でみられる天然ガス (メタン) ・石油からアスファルト鉱に至るまでの過程として 次の3つが考え

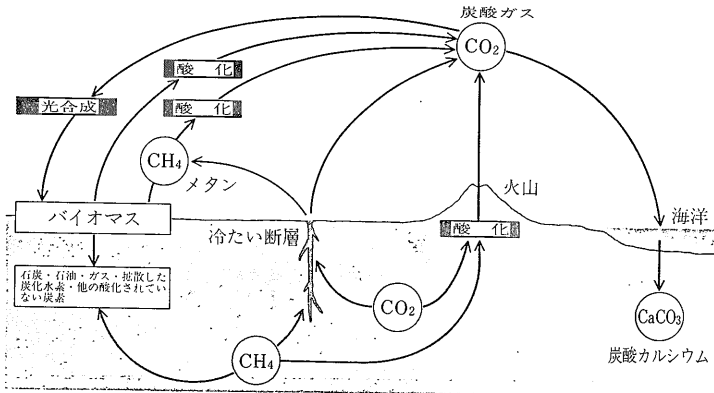
- 1) タール状有機物→アスファルト鉱
- 2) タール状有機物→(石油)→メタン→石油 アスファルト鉱
- 3) タール状有機物→二酸化炭素→メタン→石油→アスファルト鉱

メタンから果して石油ができるかどうかは今後の問題として 2) のメタン以降の変化は GOLD & SOTER (1980) 説であり また 3) の二酸化炭素以降は WAKITA & SANO (1983) 説である。ただ 3) の二酸化炭素がタール状有機物からできたのか または別の原因でマントルに含まれるようになったのか という問題が残る。この問題を考えるに当っては 次のような天文学上の事実も 参考になるにちがいない。

- 1) 金星および火星の大気の主成分は CO_2 である。
- 2) 天王星および海王星の大気の主成分の1つが CH_4 である。
- 3) 彗星のコマに HCN や CH_3CH などが含まれている。
- 4) 彗星の尾にイオン化した二酸化炭素が含まれている。
- 5) 彗星には NH_3 や CH_4 に由来すると考えられる分子が20種以上も知られている。

以上のうち 1) および2) は SAGAN (1975) に 3) および4) は BRANDT (1971) また5) は WHIPPLE (1974) による。

余談になるが WAKITA & SANO (1983) 論文の内容は Nature 誌に発表されて間もなく 木村 繁 (1983) によって朝刊朝日 ('83.11.25) 誌上で面白く紹介されている。タイトルは「新説登場! 「マグマ性天然ガス」となっており さすがに正しくかつ興味ある読物になっている。さて 高校や大学の入学試験で 「天然ガスの成因を説明せよ」という問題が出たら 教科書のとおり「生物起源説」と書けばいいのか それとも最近の「マグマ起源説」にも触れるべきか と困る受験生も



第37図 地球深部起原メタンは 空中へ 逃げるだけでなく 天然ガス 石炭 石油の鉱床の発達や維持に貢献している。(GOLD & SOTER (早川訳) 1980)

多いのではなかろうか」というのが この紹介の結びであるが 関係分野の先生方には 少くとも本当に勉強している学生・生徒諸君が損をするような出題をしない義務がありはしないだろうか。

文 献

相場博一, 1977, 地史的考察による石油の初期移動: 石油技術協会誌 42巻 2号 p.117-128.
 BRANDT, J. C. (村山定男訳) 1981 彗星の天文学: 別冊サイエンス 彗星と隕石 7~19頁
 BRILLOUIN, L. (細田・真木訳), 1946, 量子統計学及び其の金属電子論への応用: 白水社, 336p
 BURKE, K., 1963, Dissolved Gases in East African Lakes: *Nature*, vol. 198, no. 4880, p. 568-569.
 CHAPMAN, C. R. (小尾訳), 1977, 小惑星と隕石: 別冊サイエンス (特集 惑星の素顔), p. 134-145.
 CLARKE, W. B. & KUGLER, G., 1973, Dissolved helium in groundwater: a possible method for uranium and thorium prospecting: *Econ. Geol.*, vol. 68, p. 243-251.
 CLARKE, W. B. et al., 1969, Excess 3He in the sea: evidence for terrestrial primordial helium: *Earth Planet.*

Sci. Lett., no. 6, p. 213-220.

DYCK, W., 1976, The use of helium in mineral exploration: *Jour. Geoch. Expl.*, vol. 5, p. 3-20.

福田 理・永田松三, 1983a, ヘリウム資源問題 (その1): 地質ニュース, _____, 1983b, ヘリウム資源問題 (その2): 地質ニュース,

GOLD, T. & SOTER, S. (早川訳), 1980, 地震と地球深部のガス: サイエンス, 10巻, 8号, 108-117頁

GREGORY, 1896 in 矢入憲二 1979 東アフリカ地溝帯: 岩波講座 地球科学 9 p.19-31

HESS, G. B., 1977, Helium, liquid: *Encyc. Sci. Tech.*, vol. 6, p. 446-449.

HOLMES, A. (竹内訳) 1969 一般地質学 I-III: 東京大学出版会 1310p.

HORAI, K., 1964, Studies on the thermal state of the earth. The 13th paper: Terrestrial heat flow in Japan: *Bull. Earthq. Res. Inst.*, vol. 42, pt.1, p. 93-132

KAMENSKIY, I. L. et al., 1971, Helium isotopes in nature: *Geokhimiya*, p. 914-931.

KAMENSKIY, I. L. et al., 1976, Components of the upper mantle in the volcanic gases of Kamchatka: *Geokhimiya*, p. 682-694.

KANEOKA, I. & TAKAOKA, N., 1980, Rare gas isotopes in Hawaiian ultramafic nodules and volcanic rocks: constraint on genetic relationships: *Science*, vol. 208, 1366-1368.

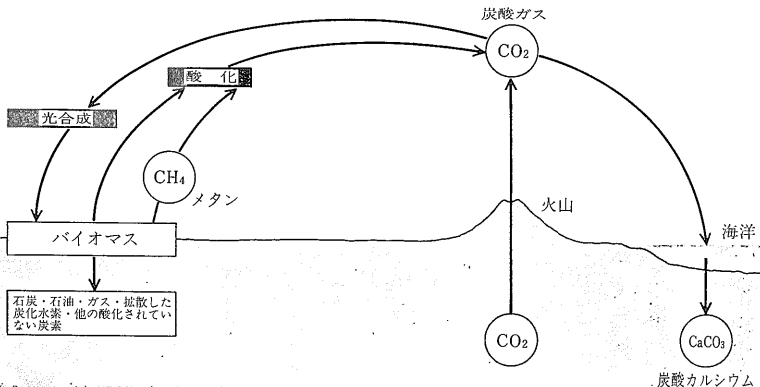
KARIG, D. E., 1971, Origin and development of marginal basins in the western Pacific: *Jour. Geophys. Res.*, vol. 76, p. 2542-2561.

河井興三, 1968, 上総層群中の水溶型ガス鉱床の成因に関連した2・3の問題: 石油技術協会誌 23巻, 1号 p.6-15.

木村 繁 1983 新説登場! 「マグマ性天然ガス」: 週刊朝日 ('83.11.25) 177頁

桐山良一・桐山秀子 1958 結晶の化学: 結晶物理学 p. 205-280.

LUPTON, J. E. & GRAIG, H., 1975, Excess 3He in oceanic basalt: evidence for terrestrial primordial helium: *Ea-*



第38図 地球上の炭素の動きに関するこれまでの考え方 これは石油・天然ガスのケロゲン起源説でもある。(GOLD & SOTER (早川訳) 1980)

rth Planet. Sci. Lett., vol. 26, p. 133-139.

MAMYRIN, B. A. et al., 1969, Isotopic analysis of terrestrial helium on a magnetic resonance mass spectrometer: *Geokhimiya*, p. 595-602.

松井孝典, 1981, パノラマ太陽系:ブルー・バックス, 307p.

松田時彦, 1967, 松代地震断層の地質学的性質:地震研究所彙報 45巻 p.537-550.

三宅静雄ほか4名 1958 結晶物理学:物性物理学講座 5 共立出版(株) 336p.

MORIMOTO, Y. et al., 1967, Landslides in the epicentral area of the Matsushiro earthquake swarm their relation on the earthquake fault: *Bull. Earth. Res. Inst.*, vol. 45, p. 241-263.

MUELLER, G., 1963, in BURKE(1963)

永田松三・伊藤司郎 1967 松代地震地域における地化学探査:防災科学総合研究速報 5号 p.29-35.

————— 1969 松代地震地域における地化学探査(続報):防災科学技術総合研究報告 18号 p.29-39.

NAGAO, K. et al., 1981, Rare gas isotopic compositions in natural gases of Japan: *Earth Planet Sci. Lett.*, no. 53, p.175-188.

中村一明 1971 松代地震から学んだこと:科学朝日 no.10 p.129-133.

NAKAMURA, K. & TSUNEISHI, Y., 1966, Ground cracks at Matsushiro probably of underlying strike-slip fault origin, I-preliminary report: *Bull. Earthq. Res.Inst.*, vol. 44, p. 1371-1384.

—————, 1967, *ibid.*, II-Matsushiro earthquake fault: *ibid.*, vol. 45, p. 417-471.

小尾信彌 1982 ビッグパンの3分で宇宙の基礎:科学朝日 no. 11 p.61-66.

大村一蔵 1934 石油地質学:岩波書店 296p.

大島泰郎 1971 宇宙の“古文書” 隕石を解読する「地球型生物」存在の可能性:科学朝日 4号 p.119-124.

POLYAK, B. G. et al., 1979, The isotopic composition of helium and heat flow, Geochemical and geophysical aspects of tetogenesis: *Geotectonics*, vol. 13, p. 339-351.

SAGAN, C. (小尾信彌訳) 1977 太陽系:別刷サイエンス惑星の素顔: 6~17頁.

SANO, Y. et al., 1982, ³He/⁴He ratios of methane rich gases of Japan: *Geochem. Jour.*, vol. 16, p. 237-245.

佐野有司ほか2名 1982 ヘリウム同位体比からみた島孤のテクトニクス:日本地球化学会年会講演要旨集 p.59-60.

————— 1983 ヘリウム同位体比:遊離ガスの測定:地震学会講演予稿集 p.236.

関口嘉一 1983 長岡地域のグリーンタフ油・ガス鉱床の形成:第48回石油技術協会において講演.

島村常男 1983 坑底試料採取:石油鉱業便覧 p.459-460.

杉本大一郎・浜田隆士 1975 宇宙地球科学:東京大学出版会 226p.

高井冬二・鎮西清隆 1967 新第三紀:地史学 下巻 朝倉書店 p.520-572.

THOMPSON, B. N., 1978, Northland: *The geology of New Zealand*, vol. 2, p. 443-449.

TISSOT, B. & WELTE, D. H., 1978 Petroleum formation and occurrence: Springer-Verlag, Heidelberg, 538p.

TSUNEISHI, Y. & NAKAMURA, K., 1970, Faulting associated with the Matsushiro swarm earthquakes: *Bull. Earthq. Res. Inst.*, vol. 48, p. 29-51.

占部明子ほか3名 1978 化学組成からみた天然ガスの地域的特徴:日本地球化学会年会講演要旨集 p.222-223.

脇田 宏・佐野有司 1982 日本海プルームとガスフィールドの形成:日本地球化学会年会講演要旨集 p.57-58.

脇田 宏ほか2名 1983 メタン系天然ガスの起原:日本地球化学会年会 講演要旨集 279頁

WAKITA, H. & SANO, Y., 1983, ³He/⁴He ratios in CH₄-rich natural gases suggest magmatic origin: *Nature*, vol. 305, p. 792-794.

WAKITA, H. et al., 1978, “Helium spots”: caused by a diapiric magma from the upper mantle: *Science*, vol. 200, p.430-432.

WELHAM, J. A. & GRAIG, H., 1979, Methane and hydrogen in East Pacific Rise hydrothermal fluids: *Geophys. Res. Lett.*, vol.6, p.829-831.

WHIPPLE, F. L. (村山定男訳) 彗星の起原とその性質:別刷サイエンス 彗星と隕石 40~51頁

吉岡 英 1977 結晶の物理:科学シリーズ 物性 2 三省堂 244p.

表1 (352号 1983年12月) 正誤表

行	欄	誤	正
10	左	空気 vpm	空気
”	中	7×10^{-6}	7×10^{-6} vpm
”	右	5.24	5.24 vpm
23	左	v/\sqrt{M}	v/\sqrt{M}
27	左	1.01325 bars (9)	1.01325 bars (η)
30	左	1.01325 bars for	1.01325 bars
31	左	$\lambda=5893 \text{ \AA}$	$\lambda=5893 \text{ \AA}$ について
”	左	$10^6 (n-1)$	$10^6 (n-1)$
46	左	液体の密度	} 1 字右に寄せる
5	”	5	
52	”	熱伝導度	
57	”	熱膨張の平均係数	平均熱膨張係数
58	”	係数	常数
”	右	1.95	1.96
59	”	蒸発の潜熱	O Kでの蒸発の潜熱