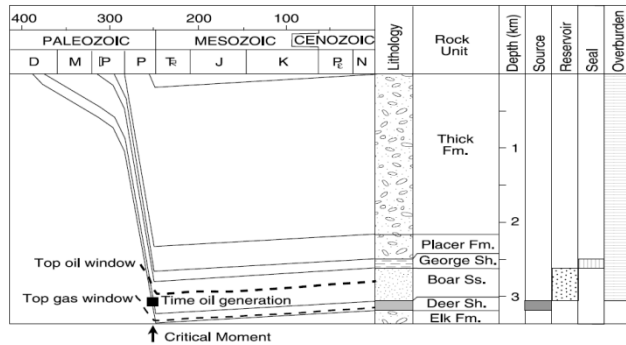


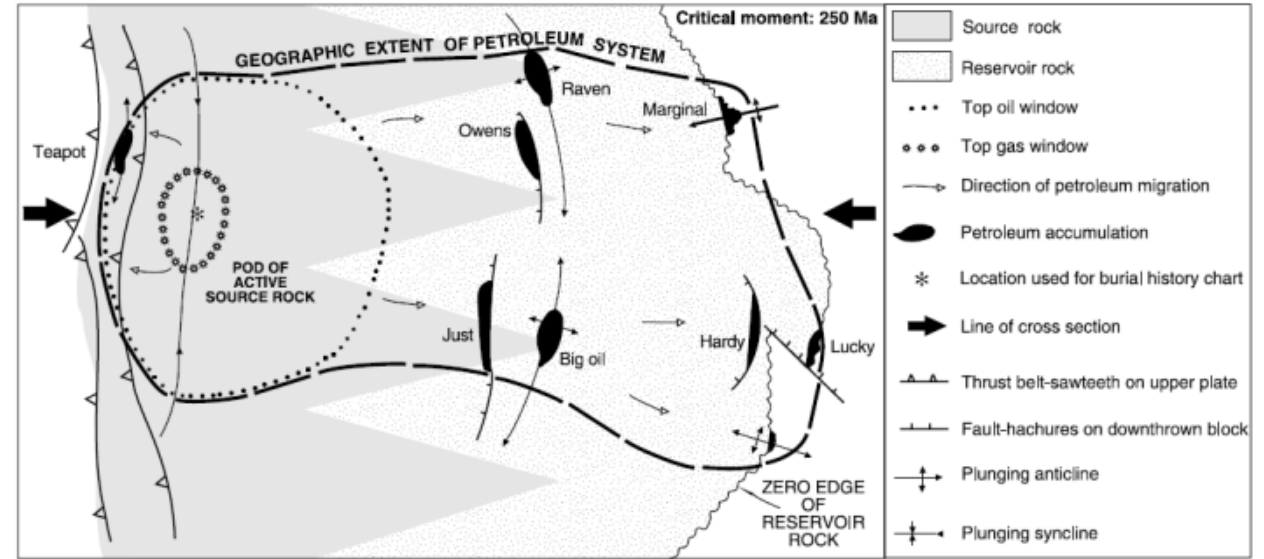
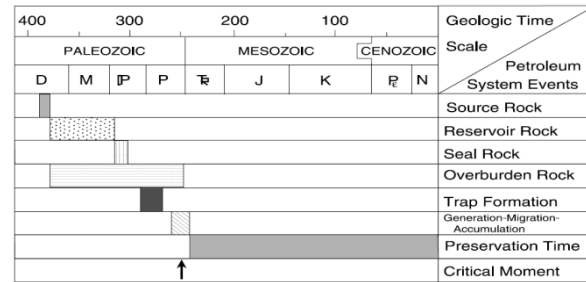
石油システム①

石油システムとは？

地下に埋蔵されている石油や天然ガスは、どのようにして生成されたのでしょうか。石油の成因には、大きく述べて無機説と有機説とがありますが、現在までに発見されている油・ガス田の成り立ちはほぼすべてが有機成因説により説明がつき、現在の石油会社は有機説に基づいた理論と技術によって石油・天然ガスの探鉱・開発を行っています。



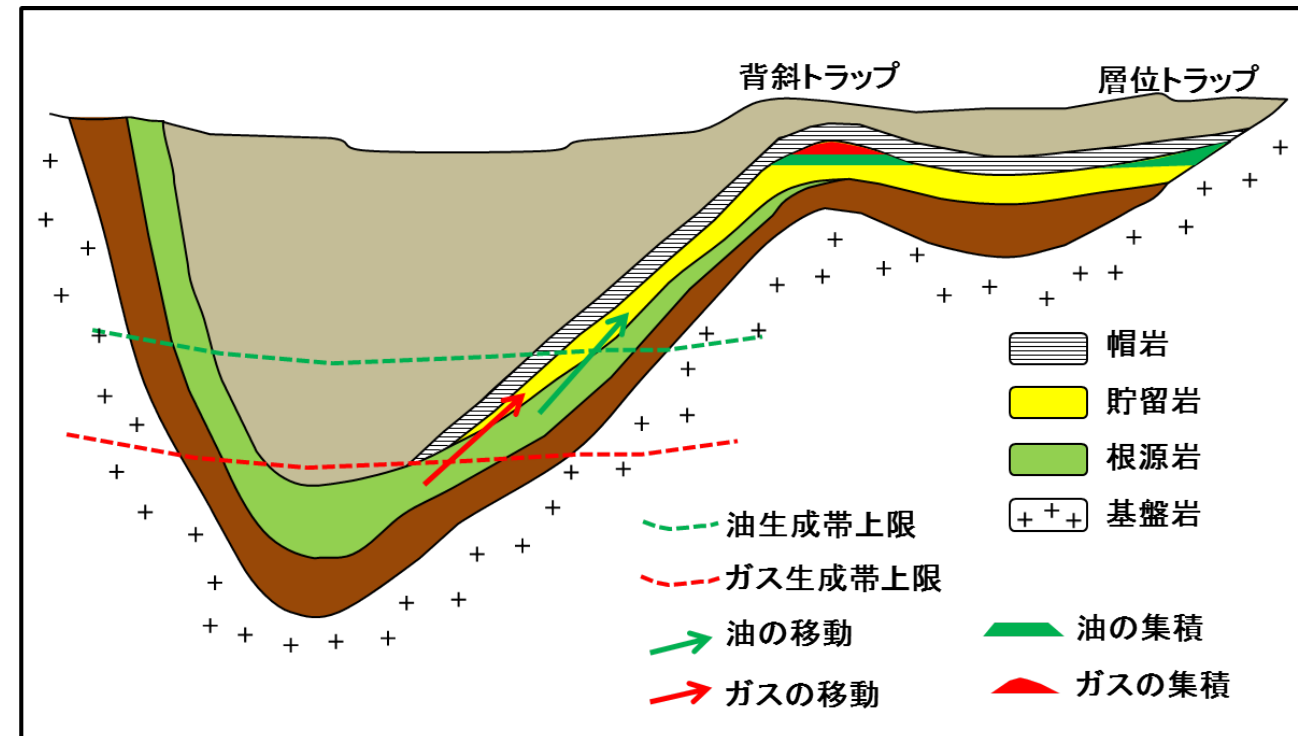
石油システムの評価(1) Magoon and Dow (1994)



石油システムの評価(2) Magoon and Dow (1994)

工業原料や燃料などに利用できる鉱物は、ただ地面を掘れば利用できるものではありません。それらが地下で濃集している場所(鉱床)を探し当て、掘り出すことではじめて経済的に利用することができます。石油や天然ガスも、金や鉄鉱石などと同じ鉱産物であり、長い地質時代を経て地下で生成、濃集して鉱床を形成したものが掘り出されて利用されています。しかし、石油や天然ガスは他の鉱石鉱物とは異なり「流体である」という特徴があります。そのため、生成と濃集が同時に同じ場所で起こる鉱石鉱物とは異なり、石油や天然ガスは広い範囲で生成されたのちに、地下のある特定の場所へと移動することによって濃集します。それは、広い範囲に降った雨水が川となってくぼ地に溜まり、湖になるのと同じようなものです。このような一連のプロセスの中で、石油・天然ガスを生成することのできる岩石を「根源岩」、貯めることのできる岩石を「貯留岩」、そしてせき止めることのできる岩石を「帽岩」といいます。また、石油・天然ガスの根源岩から貯留岩への移動経路となる地層を「キャリアベッド」、貯留岩と帽岩から構成され石油・天然ガスを貯めることのできる構造(器)のことを「トラップ」といいます。これらは、石油・天然ガス鉱床を形成する上でいずれも欠かすことのできない地質要素です。また、根源岩から石油・天然ガスが「生成」し「排出」され、キャリアベッドを「移動」し、トラップに「集積」するまでの一連のプロセス(過程)も重要です。例えば、石油・天然ガスが生成し排出されたときにまだトラップが形成されていなければ、キャリアベッドを移動しても貯留岩に集積せずに地表に漏れ出てしまいます。そして、その後に構造運動によりトラップが形成されたとしても、根源岩からの石油・天然ガスの排出が終了してしまっているとやはり石油・天然ガスは集積しません。こういった場合には、いずれも鉱床は成立しません。

このような、石油・天然ガス鉱床が成立するために必要な地質要素(「根源岩」「貯留岩」「帽岩」「キャリアベッド」「トラップ」とプロセス(「生成」「排出」「移動」「集積」)を総称して「石油システム」といいます。これらの要素がどれも欠けることなく石油システムが成立しているかどうかを確かめ、それぞれの地質要素の能力を評価することこそが石油・天然ガスの探鉱・開発を行う上で重要です。



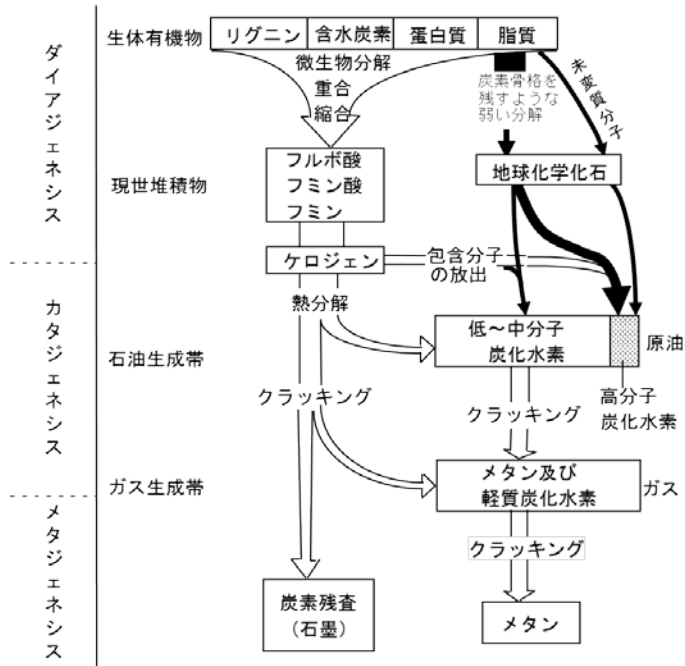
石油システムの地質要素と油・ガスの生成・移動・集積(Magoon and Dow (1994) を改編)

石油システム②

根源岩と油ガスの生成

根源岩とは、石油や可燃性天然ガスを生成する能力のある岩石のことで、具体的には有機物が多く含まれている岩石のことを指します。代表的な岩石としては泥岩や炭酸塩岩もしくは石炭などが挙げられます。この根源岩が地下に埋没して圧力と地熱の影響を受けることによって、含まれている有機物に変化(続成作用)を起こして石油や天然ガスが生成されます。

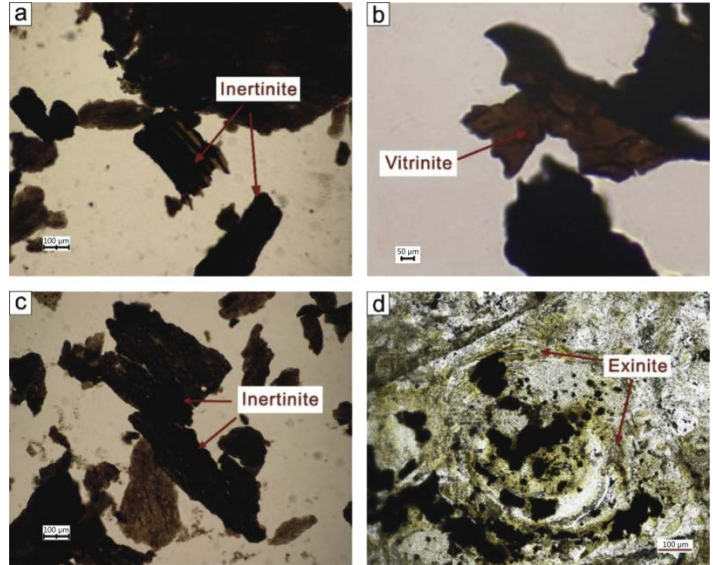
石油やガスのもととなる有機物はケロジェンと呼ばれ、その起源によっていくつかのタイプに分類されます。一つは湖などに堆積した藻類などが起源となっているものです。湖などの底層水が停滞しやすい環境では、堆積物表面の酸化作用が少なく堆積物中の有機物濃度が高くなります。もう一つは陸上高等植物の遺骸(倒木など)が起源となっているもので、このような陸源有機物が十分に供給されるデルタ堆積物や泥炭地の石炭も根源岩となります。また、これらの中間タイプとして海生および湖生の動植物プランクトン、底生生物や陸上植物の樹皮・葉・孢子・花粉などを起源とするものがあります。



有機物の進化と石油生成 (Tissot and Welte (1984) を改編)

石炭区分	揮発分 % (d.a.f.)	最大古地温 (°C)	%R ₀	T _{max} (°C)	TAI	PI	CPI	炭化水素
泥炭	60	-	0.2	-	-	-	-	微生物起源ガス
褐炭	60	-	0.3	400	1.4	-	-	未熟成重質油
亜瀝青炭	46	50	0.4	430	1.8	-	2	
高揮発分瀝青炭	33	80	0.5	430	2.6	0.1	-	油・ウエットガス
中揮発分瀝青炭	25	120	0.6	445	3.4	0.2	1.5	
低揮発分瀝青炭	13	170	0.7	450	4.6	0.3	1.2	
半無煙炭	4	200	0.8	455	4.9	0.4	-	コンデンセート・ウエットガス
無煙炭	4	250	1.0	485	5.0	-	-	ドライガス
変無煙炭	4	250	1.3	475	-	-	-	
			1.5	500	-	-	-	
			1.75	550	-	-	-	
			2.0	-	-	-	-	
			2.5	-	-	-	-	
			3.0	-	-	-	-	
			4.0	-	-	-	-	
			5.0	-	-	-	-	

石炭化度とビトリナイト反射率の関係 (Hunt (1995) を改編)



顕微鏡下のケロジェン(左上・左下:イナートナイト、右上:ビトリナイト、右下:エグジナイト) (Huほか(2017)より)

根源岩(石炭)の露頭(北海道美幌市)

このようにケロジェンは藻類や植物の木質部、樹皮、葉、孢子、花粉、樹脂、菌類などをその主な起源としており、これらは根源岩から抽出したケロジェンを顕微鏡で直接観察することによっても分類することができます。鏡下で観察されるケロジェンの組織は「マセラル」と呼ばれ、主に植物の木質部に由来する「ビトリナイト」、植物の小枝、樹皮、葉、孢子、花粉や分泌された樹脂、あるいは藻類に由来し、その構造が観察できる「エグジナイト」、そして植物由来ですが菌類等による分解を受け格子状を示す「イナートナイト」の三種類に大別することができます。

根源岩が地下に埋没すると、含まれている生体有機物は微生物分解や加水分解、さらに重縮合によってケロジェンに変化します。ここまでが「ダイアジェネシス」と呼ばれる続成作用の初期段階で、ケロジェン起源の石油やガスはまだわずかしか生成されず、バクテリアの活動によって生成されるメタンガスのみが生成されます。次の「カタジェネシス」と呼ばれる過程では根源岩がより深く埋没していくことで地熱によりケロジェンが熱分解を受けて主に油が生成され、さらに埋没が進むと油はさらにクラッキングと呼ばれる熱分解によりウエットガス(プロパンよりも分子量の大きい炭化水素を多く含むガス)やコンデンセート(地下ではガスとして存在するが、地上では凝縮して液体となる炭化水素)が生成されます。次の「メタジェネシス」では地下の高温高圧によりケロジェンの熱分解がさらに進み、ほぼメタンガスのみが生成されるとともに残渣は石墨となり、石油由来のウエットガスやコンデンセートもメタンガスまで分解されます。この石油・天然ガス生成の過程は、前述のビトリナイトに光を当ててその反射率を測定することで評価できます。一般的には0.5%までがダイアジェネシス、0.5~2.0%までがカタジェネシス、2.0%以上がメタジェネシスとされています。

一定量の根源岩から生成される油・天然ガスの総量は根源岩中に含まれる有機物量に依存し、全有機物炭素量(TOC: Total Organic Carbon)として表されます。同じ能力をもつ根源岩であっても地中への埋没速度やその場所の地温勾配によって「何時、どのくらいの量の石油・ガスが生成・排出されるか」は異なるので、石油システムを評価する上で、根源岩が何時の時代にどれだけの深度まで埋没し、どれだけの熱を受けていたか(埋没史、熱史)はできるだけ正確に把握する必要があります。

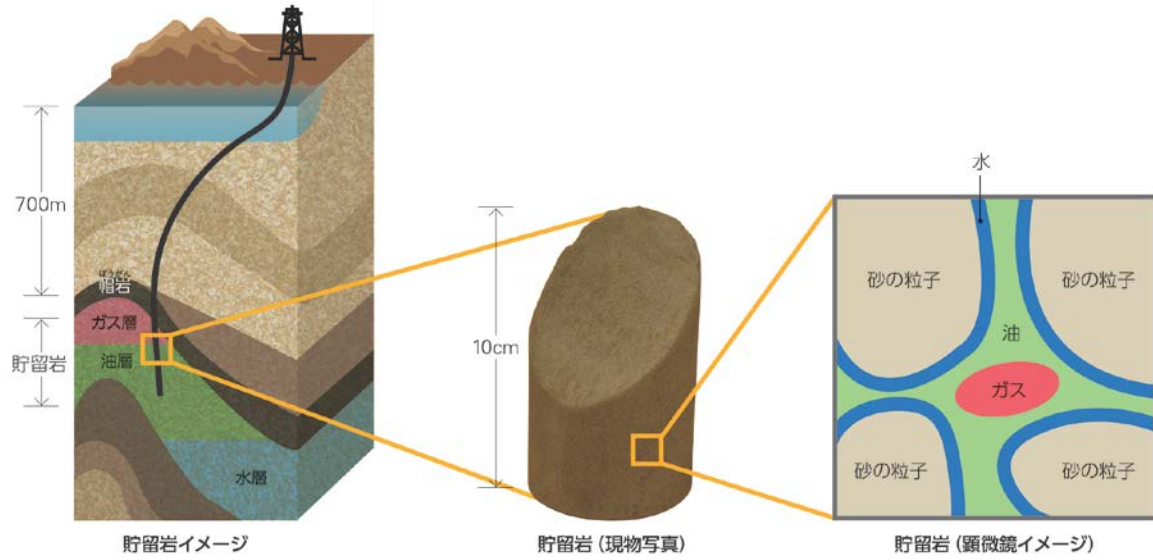
石油システム③ キャリアベッドと貯留岩

キャリアベッドとは・・・

根源岩から生成され、排出された石油・天然ガスは、さらに構造的に高い位置へ移動していきます。この移動径路となる地層のことをキャリアベッドと言います。

貯留岩とは・・・

キャリアベッドを移動してきた石油・天然ガスは、岩石を構成する粒子の隙間(孔隙)や割れ目(フラクチャー)が発達する貯留岩に貯えられて地下に眠っています。つまり、貯留岩とは、石油・天然ガスを貯留する能力のある岩石のことを言います。



石油資源開発(株) 提供

貯留岩の種類

条件さえ整えば、全ての種類の岩石が貯留岩になり得る可能性がありますが、実際に世界で貯留岩となっている岩石の種類は限られています。

貯留岩の代表的なものとして、砂岩と炭酸塩岩があり、その2種類で90%を占めると言われています。その他にもフラクチャータイプの頁岩や火成岩があり、このうち日本では火成岩を貯留岩とした石油・天然ガス田から実際に石油や天然ガスを生産しています。



貯留岩の例: (左写真)砂岩(右)・炭酸塩岩(左)、(右写真)フラクチャーの発達する花崗岩(いずれも石油資源開発(株)提供)

キャリアベッドと貯留岩の条件

岩石がキャリアベッドや貯留岩となるためには、石油・天然ガスを移動・貯留させる能力が必要となります。その能力として以下の2つが挙げられます。

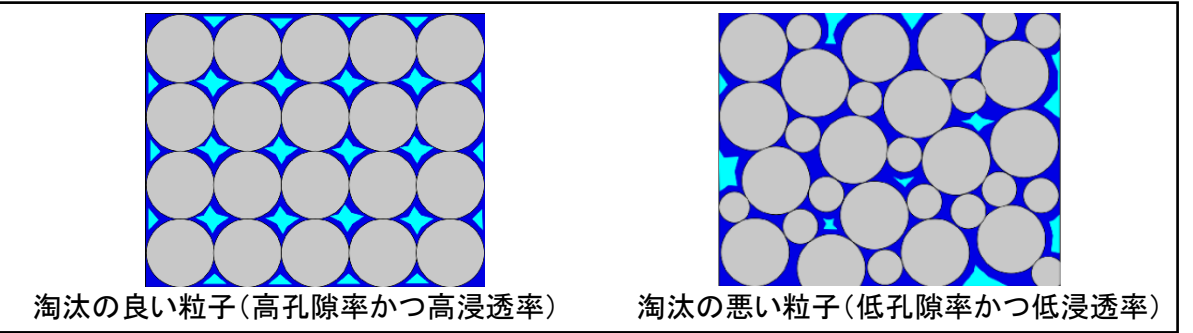
1. 高い孔隙率と浸透率を有すること
2. 適度の厚さと広がりを持つこと

貯留岩の孔隙率と浸透率

貯留岩としての能力を示す重要なパラメータとして孔隙率と浸透率が挙げられ、この双方が高いほど貯留岩としての能力が高いと言えます。

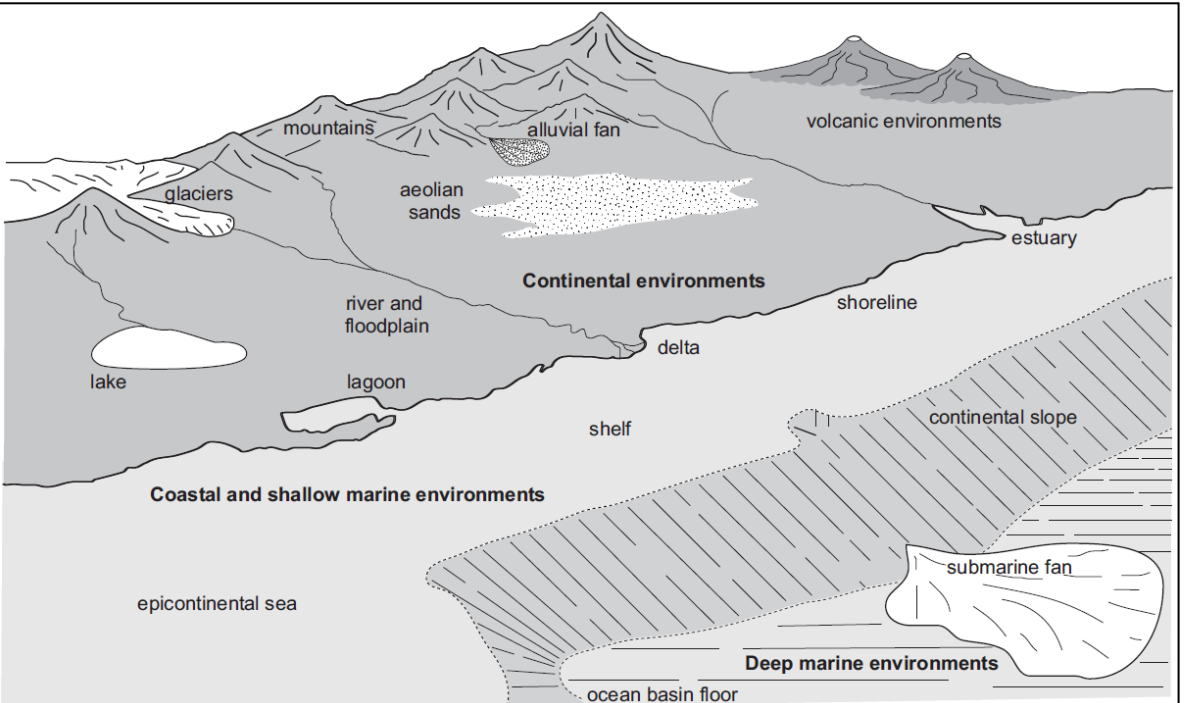
1. **孔隙率**: 岩石の総体積のうち孔隙が占める体積の割合
2. **浸透率**: 岩石内における流体の流れやすさ

大局的には、深度が増加するにつれて、孔隙率と浸透率は減少する傾向がありますが、貯留岩を構成する粒子の組成や淘汰度・円磨度といった一次的要因や続成作用などの二次的な要因など、多様な要因によってその値は変化します。



砂岩貯留岩の分布と堆積環境

砂岩は貯留岩として最も一般的なものであり、世界の石油天然ガス田の貯留岩のおよそ60%を占めると言われています。砂岩は陸域や浅海域～深海域のどの環境でも堆積する可能性がありますが、その堆積環境によって砂岩の厚さや広がり方といった分布パターンが異なります。



Nichols (2009): Sedimentology and Stratigraphy より

石油システム④

帽岩とトラップ形態

根源岩から生成・排出された石油・天然ガスは、水よりも比重が小さいので地層の中では水よりも上位に移動する性質があります。そして上位へ移動した石油・天然ガスが集積して鉱床を形成するためには、石油や天然ガスの流れを止める不浸透性の岩石の存在が必要です。このような不浸透性の岩石を帽岩といいます。

石油・天然ガスに対して不浸透性と封塞(「封鎖」と「閉塞」をあわせた石油業界の造語)性を有する岩石であればどのような地層でも帽岩となりえますが、特に帽岩として理想的とされている岩石には以下のようなものがあります。

・蒸発岩

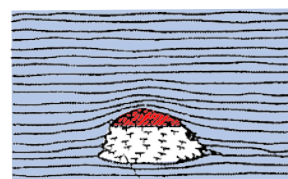
海や湖が干上がったときに、海水や湖水に溶けていた物質が固まってできる岩石で、岩塩や硬石膏が知られています。いずれも帽岩の代表的な岩相として認められています。

・泥質岩

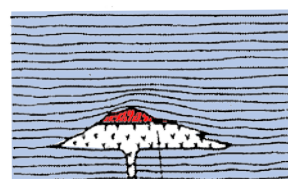
泥岩は、同じ堆積岩である砂岩貯留岩に対して代表的な帽岩となっており、世界各地の油・ガス田で普遍的に認められます。その成因から広範囲に比較的厚く分布することが多く、砂岩以外の貯留岩に対しても帽岩として機能しているケースもたくさんあります。

・火山碎屑岩

細粒凝灰岩が帽岩となっている油・ガス田が日本や東南アジアの火山碎屑岩を伴う新第三系堆積盆地において知られています。



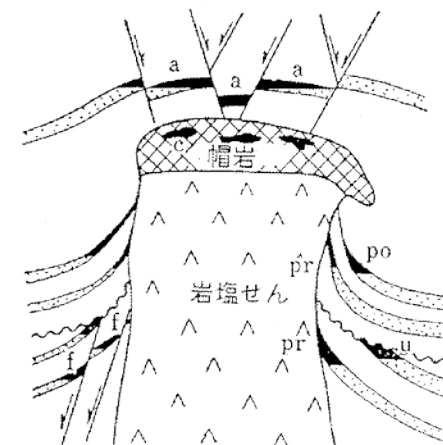
礁石灰岩



火山岩体

礁トラップ

火山岩トラップ



岩塩ドームトラップ

© Levorsen(1967)

さまざまなトラップ(石油鉱業便覧(1983)に加筆)

たとえ帽岩があっても、石油・天然ガスの移動を妨げて封じ込める「かたち(=構造)」がなければそれらは集積しません。この封じ込めを成立させる地質構造のことをトラップといいます。トラップは貯留岩と帽岩とが形成する三次元構造であり、その成り立ちによっていくつかのタイプに分類されます。

・構造トラップ

地層は一般的にはほぼ水平に堆積しますが、その後大きな力が加わって変形することがあります。このような構造運動によってできたトラップには、地層が褶曲してできた背斜構造による背斜トラップや、地層が断ち切られた断層による断層トラップがあります。

・層位トラップ

地層は一般的には側方に連続して堆積しますが、長い時間をおいて削剥あるいは無堆積を介して上位層が堆積した場合にはその連続性が途切れることがあります。このように地層が途切れることによって形成されるトラップを不整合トラップといいます。また、堆積速度や堆積する地形によっては地層が側方に変化し、貯留岩が側方で不浸透性の岩石に変わったり(浸透性トラップ)、薄化尖滅してしまったり(尖滅トラップ、レンズ状トラップ)する場合があります。

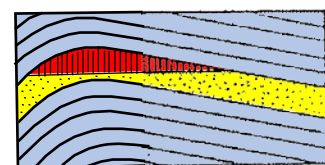
・礁トラップ・火山岩トラップ

珊瑚などに由来する礁成石灰岩は一般に多孔質で割れやすく良好な貯留岩となります。このような珊瑚礁が不浸透性の泥岩などに埋没すると礁トラップとなります。また、多孔質あるいは割れ目の発達した火山岩体が不浸透性の泥岩などに埋没すると火山岩トラップとなります。

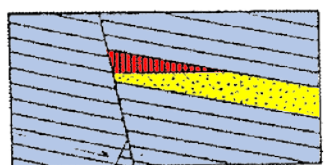
・岩塩ドームトラップ

海が干上がってできる岩塩は他の岩石よりも比重が小さく流動性があるため、地下に埋没すると円柱状に浮き上がり岩塩柱と呼ばれる岩体を形成して周辺の変形した地層も含めて岩塩ドームと呼ばれます。岩塩自体が帽岩として機能することもあり、岩塩ドームには上方での背斜トラップ、岩塩柱に近く地層の変形が大きいところでの断層トラップや尖滅トラップなど、様々なタイプのトラップが発達することで知られます。

構造トラップ

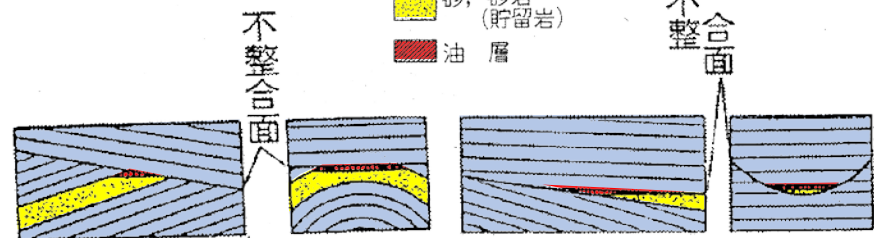


背斜トラップ



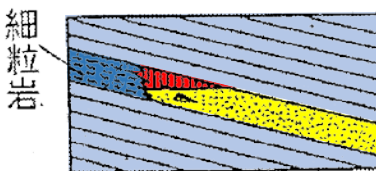
断層

層位トラップ

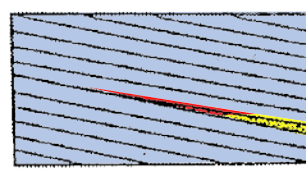


(切頭)不整合トラップ

(オーバーラップ)不整合トラップ



浸透率トラップ



尖滅トラップ

さまざまなトラップ(石油鉱業便覧(1983)に加筆)