

# 地 質 資 源 入 門

緒 方 毅

## 目 次

本論の目的	
概 説	
資源の種類	
エネルギーの用途	
石油と天然ガス	
石油とガスの起源	
石油とガスの発生	
岩塩ドームについて	
石油の採取	
環境への影響	
石油の残存量	
資源量と埋蔵量	
世界の状況	
合衆国の見通し	
重質油とタールサンド	
石油頁岩	
石 炭	
石炭の起源	
石炭の発生	
環境への影響	
埋蔵量と資源量	
ウラニウム	
金属と鉱石	

金属鉱床の起源  
火成岩に随伴する鉱石  
地表の変化に基づく鉱石  
金属鉱石とプレート・テクトニクス  
採鉱法  
環境への影響  
金属鉱物（略）  
非金属鉱物（略）  
資源代替、再生利用および省資源  
将来の展望  
（付 言）

## 本 論 の 目 的

本論を通じて、私達は人間の地質資源利用についてふれるが、地質資源の大部分は再生不可能のものである。本論の目的とする所は経済的価値をもつ主な地質資源について簡明に概説することにある。

先ず初めに各種のエネルギー資源について、どれが今や失われんとする石油の供給能力を代替しうるものであるかを考えて見る。更に論議は、金属鉱物と火成岩及びプレート・テクトニクスとの関連に及び、ついで、砂礫を含む非金属鉱物資源にふれる。

これからの展望としては、深海鉱物の採取や探査技術の習熟度上昇によって、将来に亘る資源需要量の大部分が充足されるとの楽観的見通しを表明する。

## 概 説

およそあらゆる人間の作った物体は、それを作るにあたって、何かある種類の地質資源に依存している。車は、たくさんの鉄、クロム、マンガン、ニッケル、錫、銅、鉛、また、車体とエンジンにはアルミニウム、窓ガラスには石英砂が使われている。それから種々の型で石油も使われている。例えば燃料や潤

活油を使うほか、タイヤには合成ゴムを、また、電気部品や内装部分やハンドルにはプラスチックを使うという具合である。数えあげれば数ダースに余る資源が車には組込まれていることになろう。タングステンが電球のフィラメントの中に、硫黄がバッテリーの液酸の中にといった具合にである。

一般の人々が、やっと自覚し始めたことは、彼等が地質資源に、いかにどっかりと依存しているかとううことについてである。そのうちの幾人かは、資源の消費を制限するか、少なくとも、消費の増加の割合を制限しようと試みてきた。しかし、地質資源の消費を止めることは出来ない。この文を読んでいる間もまわりにある何かあるものについて考えてみてはどうだろうか。あなたの着ているシャツは、ポリエステル入りであろう。それは石油から作られるもので、プラスチック製のボタンも同じである。ジーンズを着ている人がいたら、それは、100%綿の織物で出来ているが、また多くのジーンズは、石油合成繊維と綿の混紡の防縮織物で作られたものである。真鍮のジッパーは銅と亜鉛である。あるブランドのジーンズには銅のポケット、リベットがついている。ジーンズの背中の、皮製のふさ飾りを作るには、アルミニウムか、クロムを使って皮をなめすことになる。織物染料は殆どすべて石油でつくる。鉛筆も多くの、地質資源を使っている。トランジスターラジオではもっと多く使っていることになる。プレーヤーのレコードはビニール製であり、石油精製の誘導品である。眼鏡は石英と石油でできている。歯科の充填材は、銀やその他の金属である。

## 資 源 の 種 類

地質資源とは、地質学的現象に起因する有用物質であって、地球から抽出しうるものである。地質資源には三つの主な種類がある。

1. エネルギー資源——石油、天然ガス、石炭、ウラニウム、その他、地熱資源など
2. 金属資源——鉄、銅、アルミニウム、鉛、亜鉛、金、銀、その他多くの金属

3. 非金属鉱物資源——砂と礫、石灰岩（又は石灰石セメント製造用）、硫黄、宝石、石膏、肥料など多くのもの。地下水も亦、重要な地球資源として扱われる。

地質資源は時に、鉱物資源とも呼ばれる。しかしこの言葉は、広く使われているけれども、正確な表現とは言えない。地質資源のうち多くのものは本当の意味の鉱物ではない。例えば、多くのエネルギー資源や多くの非金属鉱物資源は、その例である。

地質資源について、極めて重要なポイントは、それらが地下水を例外として再生不能資源であるとゆうことである。これらは、極めてゆっくりと時間をかけて形成されたので、それらは現在、消費されている様な早い速度で進めば簡単に消費しつくされるだろう。地球上の資源の中で、食料とか木材とゆうものは、それらが消費されると同じ速度で生産することができる。それらは再生可能資源と言われる。しかし、石油、鉄、鉛、ウラニウム、硫黄、砂や礫など、本来、凡ての他の地質資源は、それが新しい鉱床として形成される速さ以上の速さで消費されている。このことは、結果的に、これらの資源が急速に減耗し、その希少性のために高価となり、その結果、使用量が、殆んど取るに足りない程、低い水準にまで落ち込んでしまうことになる。再生利用や、新期の発見、又は、代替品出現によって、いくつかの資源は寿命を伸ばすことが出来ようが、それは恰も、人間の生涯において、日常使われている或種の資源が、突然、品薄になり本質的に、使用不能になったようなものである。これは、文明の行詰りを意味するのではなく、技術が、これらの資源の、経済的な代替品を見出すべきものであることを意味している。そうでないと、打上げ花火のように原価が上って、殆んど全ての人の生活水準が切り下げられることになるであろう。

### エネルギーの用途

合衆国はエネルギーを大量に消費する、1970年に合衆国は、1900年に使用されたエネルギーの8倍の量を消費した。1973年には、数次に亘る原油価格の急

上昇の第一回目が起った。節約の必要性や燃料効率の良い建築や輸送とゆうようなことがますます見受けられるようになった。1979年以後になると合衆国の全消費エネルギーは減少し、石油（特に輸入石油）に対する依存は減少した。

1983年の合衆国内消費総エネルギーは、次のような資源で賄われた。

石 油	41%
天然ガス	28%
石 炭	22%
水 力	5 %
原 子 力	4 %

石油と天然ガスの量が、国内エネルギー供給の3分の2を越えていることに注意されたい。

### 石油と天然ガス

原油（又は粗原油）は自然に発生した炭化水素（水素と炭素を含む化合物）の液体混合物であり、蒸溜によって多種の石油製品を精製することができる。

天然ガスは、天然に生じた炭化水素のガス状混合物である。その起源と発生状態は、多分、石油のそれと極めて類似している。多くの油井が石油を掘り出すと共に天然ガスをも掘り出すことになる。しかし両者共、単独にも存在することが出来る。

### 石油とガスの起源

石油や天然ガスは、海底堆積物中の有機物によって発生すると考えられる。極く微少な生物個体、即ち珪藻や単細胞藻類など、は海底に定着し、海底土の中に堆積する。この際、最も好ましい環境となるものは、大陸棚やコンチネンタル・ライズ（大陸斜面が深海底に移行する部分）である。有機物質は一部は分解して、堆積物の中の溶解酸素を消費する。酸素が無くなると、腐蝕は止まり、生き延びた有機物はそのままに維持される。

堆積作用が続くと、有機物は埋没される。有機物は高温高压の条件下におか

れて、物理化学的变化を起し、有機化合物が作られる。こうして、液体及びガス体の炭化水素は形成される。泥質沈澱物が固まるにつれて、ガスと小さな石油の液滴は、泥から絞り出されて、近くのもっと多孔質の、より透水性の強い砂岩層に移動する。長い時間がたつとガスと石油の大きな集積物が砂岩層の中に集積することになる。ガスも石油も、水より密度が少いので、それらは、概して水の滲透している岩石や堆積物の中を通過して、上の方に昇っていかうとする。

### 石油とガスの発生

経済的に重要な意味をもつ石油の集積は、地下において次の三つの特殊条件が同時に揃った場所に見出される。

(1) 根源岩 (例えば頁岩) : 有機物を含有しており、埋蔵などの、堆積後の変化によって石油に変えられる。(2) 貯留岩 (通常、砂岩又は石灰岩) : これは十分に多孔質かつ透水性をもつものであって、石油を貯留し流動させることのできるものである。さらに(3) 石油トラップ (封塞構造とゆう訳語もあるが、そのままトラップの語を使う) : 石油を貯留岩中に保ち、移動により消失することを防ぐ様な一連の状態を示す。

天然ガスは、その蓄積に当って同様の状態を必要とする。ガスは、油よりも、深い所に存在出来るけれども、根源岩の変化や、埋蔵の深さ及び有機物の熱的経過等が恐らく、ガスか油か又は両者が、地域に蓄積するかどうか規定することになる。

背斜軸は最も普通の石油トラップである。石油と水が、褶曲した透水性の地層中に同時に胚胎すると、石油の小滴は、水にくらべて比重が小さいので、通気性の岩層の中を、褶曲の頂点の方へと浮き上がってくる。そこで石油は不透水性の岩石が貯留岩の上を蔽っているところで捕まえられることになる。天然ガスは油よりも更に密度が小さいから、それは石油の上部のポケット状の箇所に充分に高い圧力を持った状態で集まる。

断層が石油トラップを作るが、それは透水性の貯留岩が不透水性の岩石のところまで断層面に沿って滑った時にできる。衝上断層 (逆断層) は、しばしば、

褶曲に伴っておこる。両者共に圧縮力によるものである。コルディレラ山脈とアパラチアル山脈の双方に存在する背弧逆断層地帯は、今、盛んに石油とガスの探査が行われている。

層位トラップは、褶曲や断層によるのではなく、自然の堆積作用の結果として出来るものである。それは、例えばジューストリング型砂岩のように、大きな頁岩の地層中のレンズ状砂岩の例の様なものである。また別の型のトラップには、連続した頁岩の中に細く伸びる。先の尖った砂岩帯の例がある。油は、頁岩が貯留岩を密閉した場合には、その不整合に沿って集められる。石灰岩礁は一風変わったトラップを作ることがある。岩礁の蕊部は、通常、サンゴや海藻の

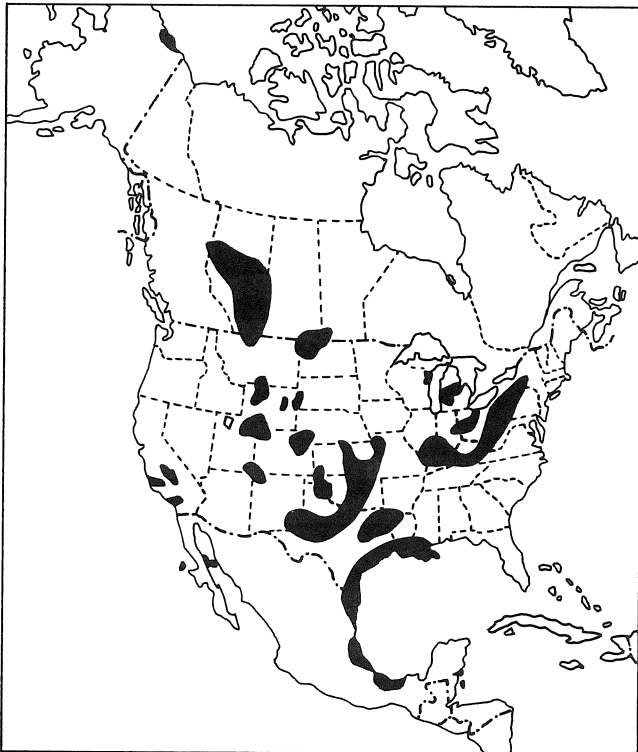


図 1 北米の主要油田

不揃な生育のために大きな空洞をなしており、油は、岩礁の蕊部や岩礁の側部にある破碎物の地層の中に貯められる。

油溜りとゆうか、地下において石油が貯溜するに至る条件の組合わせは、単純なものではない。油田とは、一つならず多くの油溜りが賦存する地域の謂である。図1に示すのは、北米の主要油田の所在を表わしたものである。合衆国内の二大油田と云えば、テキサス州東部とアラスカ州ノース・スロープである。世界に現存する石油の大半は、ソ連、中東（特にサウジアラビア）およびメキシコの巨大油田に属している。

### 岩塩ドームについて

岩塩ドームはさまざまな型のトラップを形成する。

岩塩ドームというのは、岩塩の垂直な立柱であって、緻密な岩石の中を上方に浮き上がってきたものである。それは、岩塩の厚層を形成しており、岩塩は、

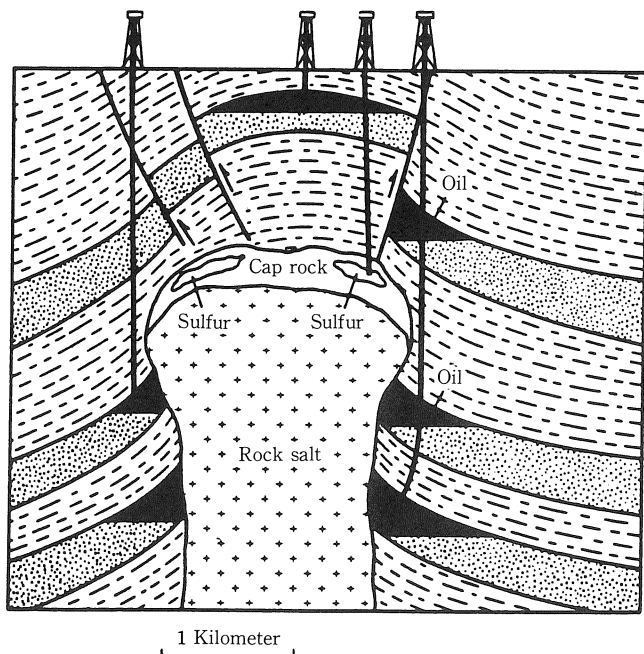


図 2 岩 塩 ド ー ム



分離した大陸縁の特徴を示している。大陸縁が沈み込んだ部分が相当な深さまで岩塩を運び、それを堆積岩の楔ではば5ないし10kmの厚さに被覆したようなものである。岩塩層の上を覆う堆積岩は、岩塩よりも密度が大きいので、被覆岩の重力にもとづく大きな地圧のもとに、岩塩は塑像のように変形し、つい得上方に動き始めた。岩塩の大きな柱が、岩塩層の頂部から浮き上り、やがて直径約1 km以上の流線型の涙滴の型となってちぎれたものである。岩塩が上に動くにつれて、周りの堆積岩は変形し、褶曲や断層が形成され、石油トラップが出来る。或物は上に突き出たキノコ型の頂部を形成するが、これが、岩塩ドームの特徴である。(図2)

岩塩が地表近くの地下水循環活動の区域に達すると、岩塩は溶解する。そこで多くの岩塩ドームは地表に到達しない。もし、岩塩が石膏を含んでいる場合には、それは、ハーフライト (halite 塩化曹達; 即ち塩) が溶けるに従って、その上部に帽 (子) 岩 (トラップをつくる不透水層のこと) を発達させるが、そうでなくて、溶解性の石膏の場合には帽岩はできない。石膏、即ち硫酸カルシウムは、硫黄を含んでおり、それがバクテリアや石油と接触すると天然のきれいな硫黄ができる。岩塩ドームの帽岩は、従ってしばしば、明るい黄色の硫黄の厚い層を含有している。

このように、岩塩ドームは、各種の貴重な資源を提供する。石油とガスは、ドームの周縁と上部で見出される。岩塩自体は地下採掘によって得られる。帽岩状硫黄は、削岩機による開孔とそれへの熱水注入によって採鉱される。合衆国においては、テキサス州及びルイジアナ州の海岸に沿って広い岩塩 (層) 帯が存在する。岩塩帯はまた、沖合にまで広がっていて、大陸棚迄あるいは、それ以上に迄及び、石油とガスと岩塩および硫黄の一大産地をなしている。

さて、地表に姿を表はしていない岩塩は、どうして発見されるのだろうか。岩塩はある場合、地表の形を変形させている。またルイジアナ州の海岸の沼沢地では低い円形の島が岩塩で持ち上げられている場合がある。もし、地下水による岩塩の溶解が急速に行われる場合には、地表のくぼ地に姿を表わす。しかし乍ら大部分の岩塩は、地球科学的探査で発見される。

岩塩の密度は2.2グラム／立方糎であってその価は、岩塩が圧迫を受けた場合でも変わらない。メキシコ湾岸のドーム帯中に存在する堆積岩は、地表面に於いては2.0グラム／立方糎の密度を持ち、深部では圧密のために2.5以上の価に増加している。岩塩ドームは、周囲を比重の重い岩石で囲繞されて、地殻平衡的な要因によって上昇する訳である。

岩塩と周辺岩石の密度の差は、ドーム上に負の重力異常を生じる。重力探査は手軽で実に安価に行われ、これがドーム発見の極め手となる。地震波射法もドームの曲面自体又は、ドーム上の変形された岩石層を表示するのに有効である。又地震波屈折法も、ドームの位置を突き止めるが、これは、地震波速度が岩塩中では速くなるからである。地震波が、予想より速く、受震地点に到達することで、岩塩の様な、高速度物質が、地下に存在することが判明することになる。勿論、掘削が岩塩の存在を示す最後の決め手であり、掘削によって初めて資源の採り出しが可能となる。それにしても掘削はかなり高い費用がかかるので通常、各種の地球科学的探査法が最初に試みられることになる。そこで、探査の結果、ドームの存在が判明すると、そのあとで、掘削するのが通常の上手な手順となる（ドームがあっても油もガスも硫黄さえも無いという場合が住々にしてあるのだから）。

### 石油の採取

油溜りや油田が発見されると、地中に油井が掘削される。固定式の油井やぐらが建設されて、長く継いだ掘削パイプが操作できるようになる。現在は、移動式掘削装置（リグ）が組立てられ掘削が終ると、取りはずして移動させることもできる。油井が油溜りに当たると、天然ガスの圧力が働いて、石油が油井から勢いよく上昇する。今日では、この石油の上昇は、常に注意深く調整されているが、過去においては、石油の噴出油井（ガッシャー）の状態はありふれていた。ガスの圧力がしだいに弱まると、石油は油井からポンプで汲みあげられる。水や水蒸気が隣接する油井から圧入されて、石油の押し出しを助けられることもある。精油所では、地中から汲みあげられた原油は、分溜されて、天然ガス、ガソリン、揮発油、潤滑油、燃料油、グリース、アスファルト、及

びパラフィンに分離する。石油化学製品は、石油混合物の各成分から得られる。石油化学製品には次の多くのものが含まれる。即ち、染料、肥料、薬品、合成ゴム、火薬類、香料、塗料、サッカリン、溶剤、合成繊維などである。そして、また、プラスチックは、次の諸種の製品を作るのに使用される。ビニール張りの家庭用水泳プール、チューブ、テント、レコード、プレーヤー、床面タイル、及びくず物入れなどである。

石油が次第に発見し難くなると、その探査は一層むづかしい環境に上げられる。北極海の海岸に近い、アラスカ州、ノース・スロープの油田開発や、アラスカ・パイプラインの建設は、新しい石油開発に伴う巨額の費用と困難を示す具体的事例である。海岸から離れて沖合に作られた作業場は、石油探査の範囲を、はるか、海底下の大陸棚やその先にまで拡大する。沖合掘削は、陸上掘削に較べて6倍内至7倍も高い費用が掛かる事実にも拘らず世界の石油のほぼ5分の1は、海岸から離れた沖合区域から生産されている。

### 環境への影響

石油を地中から採り出して消費者の所に運ぶということは、その経路沿いの各所に於いて環境問題を惹き起す基となる。石油を搬送するパイプラインは、断層や過度の消耗作用や、戦争行為などによって破壊されて、油漏れを起すことがある。衝突や座礁によるタンカーの原油漏洩（例えば1976～77年の冬に起った、マサチューセフト沖合のナンタケット浅瀬に乗上げたアルゴ・マーチャント号事件）は、海上にオイル・スリックス（油滑面）を作り出す。沖合作業場では、これまた、石油流失事故が発生する。（例えば、メキシコの作業現場で3百万バーレルの油が、1979年から1980年にかけて、メキシコ湾に流れ出した事件）。油滑面は浜辺に流れ着き、波打際を汚染する。地表沈下は石油の（地中における）移動によっても起ることがある。カリフォルニア州、ロング・ビーチに近いウィルミントン平野では、50年間に約9メートルの沈下を示した。堤防を作ることによって、海水が浸入してその域が水浸しになるのを防いだことがある。石油の精製や燃焼と、その際に発生する物質が、大気汚染を起すことがよくある。技術進歩と厳重な法的規制によって、こうした有害な環境汚染

をある程度抑制する試みが進められている。

### 石油の残存量

資源量と埋蔵量：二つの異なる言葉が、地球上の未採掘の地下資源の量を現わすのに使われている。

この術語は、石油にだけでなく、すべての地質鉱物に対して適用される。資源量とは広い意味をもつ言葉であって、凡ての鉱床（既発見も未発見も含めて）の中にある地下鉱物の全量に対して用いられる。それは、現状において経済的に採収可能な鉱床のみならず、将来、経済的に採収される鉱床も含むものである。

資源量を評価することは極めて難しいことである。何故ならば熟練した推量とは、未発見の鉱床の存在と規模についてと共に、如何なるタイプの鉱床が他日・経済的に採収可能となるかについても、なさるべきだからである。埋蔵量というのは、資源量のうちの一小部分の謂にすぎない。それは、現状の下において経済的かつ合法的に採収可能な、既発見鉱床のことである。換言すれば、それは地下資源の短期間の供給といえよう。

ひとたび、資源量が入念に評価されたときは、その評価量は、年毎に変えるべきではない。とゆうのは、本来、資源量の評価というのは、将来に亘る全供給を意味する筈だからである。しかし、埋蔵量の評価は、四六時中変化する。埋蔵物質の採収と消費は埋蔵量を減少させ、新しい発見は埋蔵量の増加となる。何故ならば、埋蔵量の定義の重要な部分は、鉱床の存在が我々の既知のものでなければならないからである。

鉱床はまた、採収して採算のとれるものでなければならない。さらに多くの要因によって採算は左右される。採収に要する費用、それは当然、従業者の給料を含むが、その外にも設備を運転するに必要な動力費や燃料費も大切である。採収の費用を軽減するような新しい創案工夫があれば、埋蔵量は増加することになる。最近、天然ガスと石油について実際に行われたような価格が政府によ

って人為的に低く押えられる場合には、埋蔵量は当然に減少する。何故ならば、押えられた価格において採算的に採収される鉱床の数が少なくなるからである。逆に価格が上れば、より多くの鉱床が経済性を持つことになり、埋蔵量は、新しい発見を伴わないでも、増加することになる。鉱業会社が支払う税額を減らしてやることもまた、埋蔵量の増加につながる。

法律の改正が埋蔵量に影響する場合がある。広大な面積の政府所有地は、採鉱や掘削禁止になっており、そのため、これらの土地に埋蔵されている地下資源は、合法的採掘が出来ず、埋蔵量に算入することができない。採掘のために多くの土地を解放することは、結果的に埋蔵量を増加させることになる。

世界の状況；現時点で、世界の石油埋蔵量は500から600×10<sup>9</sup> バレルと見込まれる（1 バレルは42米ガロン、159リットル）勿論、資源量は埋蔵量よりも大きい。ある人はこれを2000×10<sup>9</sup> バレルと見込んでいる。

世界の現在の原油消費量は約 20×10<sup>9</sup> 億バレル毎年であるから、既存埋蔵量は僅かに25ないし30年の供給量を産出しうるように過ぎない。新しい発見と回収技術、さらに価格の上昇が、将来の埋蔵量を追加することになる。だが、どの程度追加できるかを予言することはむずかしい。

原油の幾分かは採取不可能である。石油は場合によって掘削の費用を保証できないほど小さな油溜りに存在することがある。ある油溜りは市場から余りに遠く離れた場所にあったり、掘削を禁止されている地域、例えば国立公園とかその他の公共用地に賦存することがある。また石油の採取全体を通じて言うと、全油溜りのうち約40%程度しか地上に取出せないものである。残りは地下に残されることになるが、それは現在の技術並びに価格では採収することが極めてむづかしくまた、巨額の費用がかかるからである。

合衆国の見通し：合衆国の石油消費量は年間約 6 × 10<sup>9</sup> バレル（世界の人口の6%でもって合衆国は世界の石油生産の約30%を毎年消費する）合衆国の埋蔵量は、目下のところ、30×10<sup>9</sup> バレルである。合衆国はその消費する石油の50%以上を輸入に頼っている。従って国内生産は年内約 3 × 10<sup>9</sup> バレルである。ということは、現在の生産比率で推移すれば10年の供給量があるとい

うことになる。もし生産の速度をあげれば、埋蔵量の寿命は短くなる。

埋蔵量の評価は年々変るために、資源量の算定は経済計画立案の目的のためには、一層重要な意味を持つ。この種の算定数字は過去25年に亘って大幅な変動を繰返してきた。最近の政府並びに産業界の資源評価では、60から120+億バーレル（埋蔵量に加えて）の間となっている。この意味するところは、現在の生産速度では埋蔵量と資源量を加えると残された石油の供給量は30から50年あることになる。合衆国は、間違いなく油を使い尽そうとしている。そして近い将来代替燃料かより多くの輸入石油を必要とすることになるだろう。

天然ガスの評価も、同様に明るくない、主な理由としては、関係者は、ガスの発見が石油の発見とつながっていることを挙げている。過去に於いて、ガスは、石油とある一定の比率をもって見出されてきたので、関係者の中には、石油が使い果されているということはガスも使い果されていることなのだとする者もいる。

合衆国は毎年約20兆立方フィート(TCF)の天然ガスを使用している。埋蔵量評価は、200ないし400兆立方フィートであり、資源量としては、おそらく600兆立方フィートに及ぶであろう。これらの評価では、天然ガスの寿命は合衆国において40ないし50年ということになるだろう。

しかし、最近行われた天然ガス価格の一部規制解除は、ガスに対する新たな関心を呼び起し、従来の資源評価を修正させることになった。新評価は従来と違ったガス源に根拠を置くもので従来と違って原油につながらないものである。例えば、石炭層中にガスが、300ないし500兆立方フィート存在する。（ガスは炭礦技術屋にとっては障害となるが、それは有毒でかつ爆発のおそれがあるからである）しっかり固った砂岩（含ガス砂岩）は合衆国西部に賦存しているが、200ないし800兆立方フィートのガスを内蔵するといわれている。合衆国東部に賦存する有機物質に富んだデボン紀の頁岩は500ないし600兆立方フィートのガスを埋蔵している。ガスは石油より深い所に存在できるので、堆積盆地における（5 kmを越す）深尺掘削では、かなりの量のガスを産出することになるらしい。ガスはまた、メキシコ湾沿岸の（大地圧地帯と呼ばれる）割れ目の多い岩

石に含まれる温塩水中に溶け込んでいて、3000兆立方フィート相当のガスが含有されているらしい。本当に驚異的な量のガスがガスの水化物として結びつけられるかも知れない。それは二つの異常な環境における天然ガスと水とから成る特殊な固体であり、一つには、深海底、二つには永久凍土の下に於いて形成される。1,000,000兆立方フィート以上のガスが水化物の形で（世界中に）存在するというソビエトの予測が、米国でも可成の支持を受けている。これらの予測は凡て、資源量としてであって、採収可能な埋蔵量としてではない。埋蔵量となれば、はるかに少ない量になるであろう。地質学者の一部には、凡ての資源評価は、甚だしく楽観的であり、誤った判断に導くものであるとして割引きした評価をする者がいる。だがこれら従来見られなかった凡てのガス源は、今日、極めて真剣な注目を浴びている。かなりむづかしい採収上の問題点が未解決ではあるが少なくとも合衆国は、従来考えられていた程度のガスの不足では済まされない状態にあるという注意深い楽観主義が存在すると云うべきであろう。

### 重質原油とタール・サンド

重質原油というのは、濃度の大きい、粘着性の強い原油である。それは油井に流れてくるが、流入速度が極めて緩慢でそのため採算に合わない。結局のところ、重質原油は、より粘性の少い軽質油や標準的な原油の埋蔵量又は、資源量の評価からは除外されることになる。重質原油は、油井に蒸気や溶剤を注入することによって、流れを速くすることができるし、若し採収可能ならば、それを精製することによって、軽質原油なみに、ガソリンやその他多くの石油製品を得ることができる。

タール・サンドは、アスファルトで固められた砂又は砂岩から成る鉱床である。アスファルトは固体なので、タール・サンドも孔を掘削されるより、坑道で採掘される方が多い。実は、重質原油の粘性を下げる技術は、タール・サンドに対しても、同じように効果を示す場合が多い。

重質原油とタール・サンドの起源は、はっきりしていない。それらは、通常

の原油から、軽質成分が蒸発するなどの経過をたどって消失した時に作られたかもしれない。タール・サンドやアスファルトは地表にしみ出たものである（ロス・アンゼルス・ランチョ・ラ・ブレア・タール・鉱山はその例である）が、恐らく石油が蒸発して生じたものであろう。だが、重質原油とタール・サンドの中には、地下4,000メートルの深さで見つかるものもある。その中には、かなり高度に濃縮された、硫黄やその他、ニッケルとかヴァナジウムなどの金属を、通常の原油より以上に含有するものが多い。これらの事から考えると、重質原油とタール・サンドは、軽質の原油とは幾らか違った起源からできたものかも知れない。

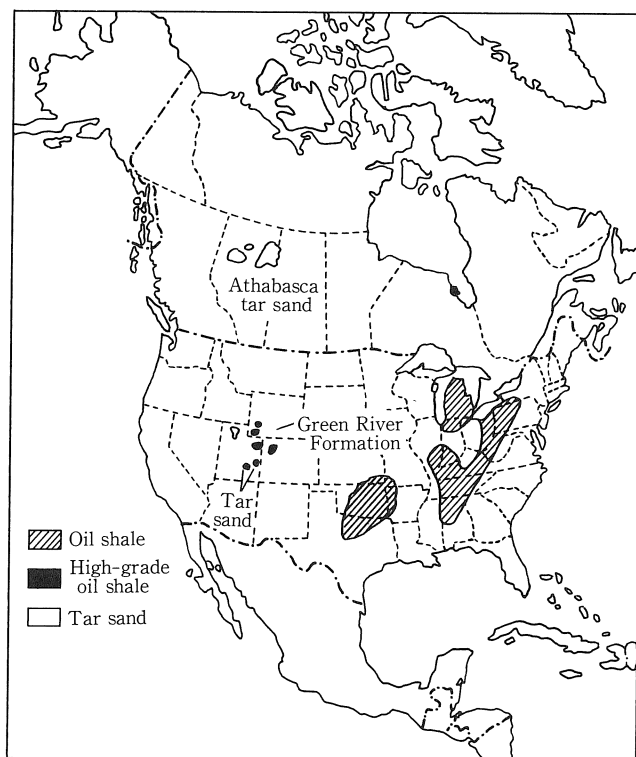


図 3 合衆国とカナダの主要な重質油鉱床などの分布



有名なタール・サンドの鉱床としては、カナダ、アルバータにある、アサバスカのタール・サンドがある。(図3) この鉱床は、ごく最近に、露天掘が行われているが、 $1,000 \times 10^9$  バレルの石油を含み、そのうち、 $300 \times 10^9$  バレルは採収可能である。合衆国は、 $100 \times 10^9$  バレルの重質原油とタールを埋蔵している。そのうち約  $30 \times 10^9$  バレルはユタ州に第三紀のタール・サンドとして賦存している。そのうち半分は、最終的には、採収可能と思われる。そのことは言い換えれば、重質原油とタール・サンドは、将来石油を、米国の軽質重油埋蔵量と同じ量だけ供給出来るということ、そして、合衆国はカナダやベネズエラ（同国はカナダより多くのタール・サンドを所存している）の双方から輸入できるようになることを意味している。

### 石 油 頁 岩

石油頁岩は黒色又は褐色の頁岩で、多くの量の固い有機物を含み、それから蒸溜によって石油を取り出すことができるものである。合衆国で最も知られている石油頁岩は、グリーン・リバー累層である。それは、コロラド、ワイオミング、およびユタの各州に亘って、4万平方マイル以上の範囲に及んでおり、厚さは650m以上の厚層から成っている。石油頁岩は、多くの魚類の形をもつ化石を含んでいるが、大きな、やや幅の狭い形の、始新統の湖底に堆積した泥土から出来ている。有機物は、湖に棲息していた、海藻などの、生物体由来している。

グリーン・リバー累層は、岩石1トン当たり25ガロンの石油を産出する。資源に富む地層の中に  $400 \times 10^9$  バレル以上の石油を含有している。他に  $1,400 \times 10^9$  バレルの石油も、トン当たり10ないし25ガロンを産出する低品位の地層の中に見出される。評価量300ないし  $600 \times 10^9$  バレルが採収可能である。

それに対して、モンタナ州にある低品位の石油頁岩は、頁岩中に  $180 \times 10^9$  バレルの採収できる石油を含有しているが、それが、ヴァナジウム、ニッケル、亜鉛を多く含んでいるために、十分に経済的に採掘されると思われる。こ

のように、石油頁岩は、将来、米国の液体原油が終る時に、多量の石油を供給することが潜在的には可能となる。

一、二個所において大規模の蒸留工場が、石油頁岩採掘のために建設されている。小規模の試験工場は、この十年間、継続的に操業を続けてきたが、液体原油が過去に於いて、低価格であったために、シェール油の採算はとれなかった。最近の石油価格の上昇と、連邦政府の支援の増大によって、将来は、シェール油の大規模生産が実行可能になるであろう。

石油頁岩の採掘では、環境への影響がかなり考えられる。先づ場所の問題がある、というのは蒸留する間に、頁岩は膨張するものである。使用済の頁岩は、低地に積みあげて締め固められるが、土地の開発がかなり厄介なものになる。蒸留と埋立のどちらにも莫大な量の水が必要になるが、水の供給は、乾燥したアメリカ西部においては、常に問題である。頁岩を地表まで運び出すこともなく、その場所において石油を抽出するような新たな処理技術があれば、問題はかなり解決し、水の必要量をも減少させるのに役立つであろう。大きな地下の洞穴の中で破碎された石油頁岩を燃やすということは可能なことである。熱が石油の大部分を岩石から分離して、液体として集めることができる。また別に、電波やマイクロ波で頁岩を熱して、液体としての石油を岩石から分離するという計画も行われている。

## 石 炭

原油と天然ガスに次いで、石炭は第3位のよく使われるエネルギー源である。石炭は、1900年には合衆国内で消費されたエネルギーの90%を占めていたが、今日では僅か22%にとどまっている。石炭消費は将来、原油が希少化し、より高価となるにつれて増加するものと思われる。

合衆国での現在の石炭消費のうち、80%以上は発電用に使われている。石炭はまた、コークスを造るのに使われる。コークスは製鉄に用いられる。将来、石炭は石油に代って、ある種の化学製品の製造に用いられることになるだろう。

石炭から得られる石炭ガスや石炭オイルが、石油に代替して、各種の用に使われるだろう。これらの製品は、天然ガスや石油の手ごろな類似品であり、同じ目的の一部に使われる。ただしそれらは、今なお、かなり費用をかけて製造されている。石炭はまた、破碎して、水と混ぜて、スラリーにすることができる。スラリーは、パイプラインで輸送され、液体燃料として燃焼させることができる。

### 石炭の起源

石炭は、緻密に固められた植物性物質から作られた堆積岩の一種である、ただし植物性物質は、完全に腐敗したものではない。かなり速い植物成長と、水中で、酸素の供給の少い状態で沈積することが必要であるので、温帯又は熱帯性気候の比較的浅い沼沢地などが、沈積するのに好ましい環境となる。石炭層中の植物化石には、葉、茎、樹幹、そして時には下部の頁岩層にまで根を張った切株が含まれていることから見て、明らかに、大部分の石炭は、正しく、植物が生育していた場所で、形成されたものである。

沢山の植物性物質の中の一部分が腐敗することによって、沼沢池の水中にある僅かな酸素までも全部使い果されて、腐敗が止まり、生き残った有機物質は、そのまま保存される。沈澱物が埋没して、植物性物質を圧縮し、次第に水分や、揮発性成分を放出させる。石炭は、その含有する炭素の量が増えるに従って褐色から黒色へと変化する。

表 1 は、石炭の通常の種類（品種）を示す。泥炭というのは、もじゃもじゃした層状を成さない植物質物質で、石炭ではなくて、おそらくは、石炭生成の

表 1 石 炭 の 種 類 (品種)

	色	水 分 (%)	揮発分 (%)	固定炭素 (%)	発熱量概算 (BTU単位/ポンド)
泥 炭	褐 色	75	10	15	不 足
亜炭(褐炭)	黒褐色	45	25	30	7,000
亜 瀝 青 炭	黒 色	25	35	40	10,000
瀝 青 炭	黒 色	5～15	20～30	50～75	12,000～15,000
無 煙 炭	黒 色	5	5	90	14,000

第一段階を示すものであろう。泥炭の火は、スコッチ・ウイスキーに、いぶしたような風味をつけるのに使われる。泥炭は、圧密されると、亜炭（褐炭）に変わるが、これは肉眼で見える木片を含んだままのものである。亜炭は軟かく、空気にふれて乾くにつれて、碎けることがある。それはまた、空気中で酸化が進むにつれて、自然発火をおこし易くなり、このことは亜炭の、燃料としての用途を、幾らか制限することになる。亜瀝青炭および瀝青炭（軟質炭）は黒色を呈し、質の違う植物質物質の層のために縞状を示すことが多い。これは、扱うとよごれ易く、火付きが早く、また有煙の炎をあげて燃える。無煙炭（硬質炭）は、正しくは変成岩の一種であり、一般的には、褶曲を伴う、局部的圧縮を受けた場合にのみ、形成される。

### 石炭の発生

石炭というのは、堆積岩の一種であって、成層状態で発生するが、圧さは、1 m以下のものから、50mに及ぶものまで、様々に変化する。炭層が深部に埋

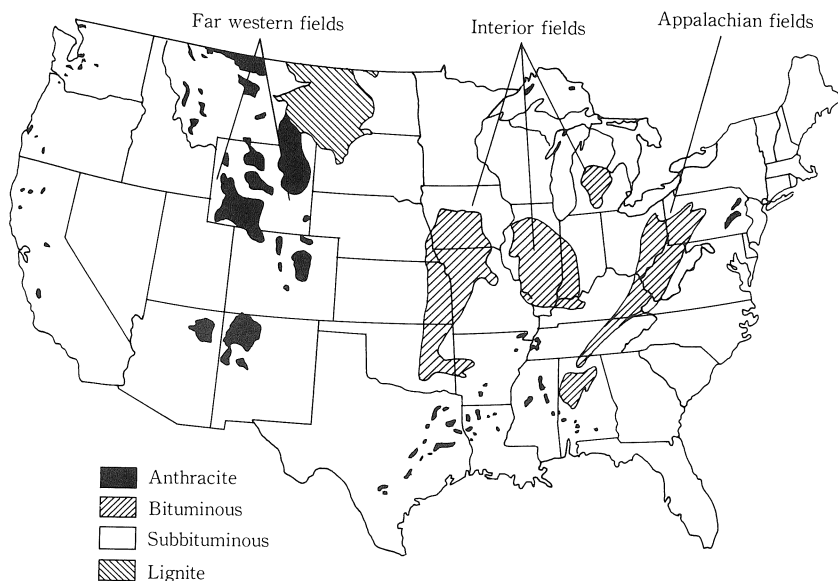


図 4 合衆国の炭田（除、アラスカ）

蔵されている時には、坑内掘りによって石炭は採取される。また、炭層が地表近くにある時には、石炭は露天掘りで採炭される。露天掘りでは、表土は取除かれて、石炭が地表に露出する。露出された石炭が掘り出され、取り除かれたとき、あとに残った掘り跡は、隣接する露天掘の表土で埋められる。

図4は、米本土48州の中の炭田を表わしている。さて、アパラチア炭田、内陸部炭田、極西部炭田という、3つの大きな炭田について、話を進めよう。

合衆国において、最大の石炭生産をしているのは、アパラチア炭田である。これは、ペンシルヴァニアからアラバマ州まで拡がっており、広大な瀝青炭層から成っている。この石炭は、大部分がペンシルヴァニア紀（古生代上部のうち石炭紀の上半部）に属しているが、一部には、同じく石炭を若干含む、ミシシッピー紀（石炭紀の下半部）や二疊紀（古生代の最上部層、石炭紀の上にある）の岩層を伴っている。炭層は、西部に向かって薄化しているが、古生代後期におけるアパラチア造山運動による褶曲と断層の中に含まれており、その為、造山帯の東部においては、甚だしく、変形されている。急傾斜した炭層のため、大方は坑内掘りである。褶曲は、西にゆく程ゆるやかで、そこでは、石炭は、坑内掘り、露天掘りいずれにしても、採掘することが出来る。ペンシルヴァニア州北東部においては、激しい褶曲のために、一部において、無煙炭を産出する。

この地域の多くは、25枚から50枚の炭層が存在する。各層は、通常、2米弱の厚さであるが、一部でそれより厚くなっている所もある。石炭は、砂岩、頁岩、石炭岩の互層（繰返し重なった累層）の中に賦存しており、このことは、陸地と海とが交互に繰返されたことを示している。さらにそれは、海洋に近い低地性環境、即ち、例えば潟であるとか、大きな三角州、さらには、沼沢に富む海岸平野などを意味している。それに類似した環境は、今日でも、フロリダや、ジョージア、および南カロライナで見ることができる。

内陸部炭田は、ミシガンから、イリノイを通して、テキサス州に至る迄の間に展開していて、アパラチア山系の岩層が、西に向って、大陸内部の方へ延長されたものである。ミシガンやイリノイ州においては、これらの岩層は大きな

盆状構造の中に存在している。石炭はたいいて露天掘で採掘される。特にイリノイ、インディアナ、ケンタッキー州において、盆状構造周辺部に位置している大工業都市の近郊においては、そうである。

極西部炭田はニュー・メキシコ州から、ロッキー山系を通してモンタナ州、および、ノース・ダコタ州の大平原（そして、さらにはカナダまで）に至る間に広がっている。この石炭層は、東部の（アパラチア炭田の）石炭に較べると、炭層の厚さが増し、時代的に、より若い時代のものである。それらは、大体において、中世代白亜紀（一部は新世代第三紀）のものであり、厚さ50mに及ぶものである。石炭は大きな盆状構造の中に胚胎し、通常、低品位のもので、亜炭かまたは、亜瀝青炭である。勿論一部には良質の瀝青炭があり、コロラド州やユタ州に存在している。多くの厚い石炭層が地表にかなり近く横たわって、露天掘されている。しかし、州によっては、地下採掘（坑内掘り）の行われている所もある。西部の炭田の石炭は極上質の燃料であり、目下、極めて高い需要がある。というのはこの石炭は、東部の石炭に較べて硫黄分が少いからである（硫黄化合物は、石炭を燃やす時に、空気を汚染するものになるものである）。

### 環境への影響

石炭の掘採も使用も、共に環境上の問題をひき起こす。鉱山が存在するという場合には、大抵の場合、坑内水を汲み出すにつれて、その場所の地下水位を引下げることになる。鉱山から出てくる排水は、強い酸性を呈するものが多く、地表の河川や上水道を汚染することがある。過去には、露天掘りは荒廃した見苦しいくずの山として埋め戻されていたが地面を平らに直し、取り除けた表土を埋戻す新しい技術によって、採掘跡を他の用途に再利用することが容易になっている。石炭を燃焼させると、灰の粉塵や、硫黄を含んだガスが空気を汚染するが、有害成分の大半は、現在の技術によって除去することができる。石炭と関係する環境問題の解決が、採掘費用と消費者価格の上昇をもたらすことは当然である。

### 埋蔵量と資源量

合衆国における石炭生産は年間8億トンである。(合衆国の使用量は7億トンで、残りは輸出される)。生産量の半分以上が地表の露天掘炭鉱からなされる。ケンタッキー、ウエスト、バージニア、ペンシルヴァニアの各州が今なお大半の石炭を生産しているが、低硫黄分の西部炭田の大規模の石炭層が急速に開発されているのでやがて、北部ロッキーの各州が、アパラチア炭田の各州を凌駕することになる。

合衆国内の採収可能な埋蔵量は400ないし $800 \times 10^9$ トンである(このうち約4分の1はノース・ダコタ州の亜炭である)。考えても判るように、現在の生産速度でいけば、あと数百年分の石炭が残存していることになる。

地表から1,000mの範囲内にある石炭資源量は $1,600 \times 10^9$ トンである。それより深部には、さらに、同量の石炭が賦存していると評価されている。したがって、合衆国全体の資源量は、 $3,200 \times 10^9$ トンという感動的な量となる(そのうち多くの部分は、勿論、現実的に使える訳ではない)。海外市場向けに採収量を増加させたとしても、米国の石炭供給が、非常に長い時間続くことは、明白なことであろう。

### ウ ラ ニ ウ ム

金属ウラン、それは原子炉に動力を供給するものであるが、は閃亜鉛鉱として産出する。それは熱水鉱脈の中に見受ける、黒色の酸化ウランであるが、合衆国内でもっとも普通に見られるのは、堆積岩の中にちりばめられている、複雑な水酸化物としてのものである。地下水は酸化ウランを簡単に運送する、というのはそれが極めて溶解性が高いからである。有機物はウラニウムを環元して、比較的不溶性のものに変えるので、ウラニウムは有機物と結合することによって沈澱する。

合衆国において、容易に採収し得るウラニウムの大半は、ニュー・メキシコやワイオミング州の砂岩層の中に見つけられる。そしてそのうちの若干のもの

は珪化木の中や周りで見られる。1950年代のウラニウム・ブームの時は、西部の山師たちは、石質化した丸太を探して、それをガイガー計数管で測ったものである。ある唯一個の丸太が、1万ドル担当のウラニウムを含んでいたことがあった。多くのウランは植物の破片などを含んでいる、砂岩質の川底の中に存在している。

アイダホやフロリダ州にある海成の有機燐灰石鉱床もまた、ウラニウムを含んでいる。ウラニウムというのは、凝縮しているわけではなく、ただ鉱床が非常に大きいので、全体として見れば、鉱床は多量のウラニウムを含んでいる。合衆国東部のデボン紀に属する黒色頁岩もウラニウムを含有する。この頁岩は実は低品位の石油頁岩であり、多量の天然ガスを包蔵している。ウラニウムは結局、別の鉱物を目的とする採掘作業の副産物として、燐灰石や頁岩から回収される訳である。

ウラニウムは、電気をおこす原子炉や核兵器又は或種の軍用船舶などに使用されている。現在、原子炉は合衆国のエネルギー必要量の約4%を生産している。この数字が、将来、目に見えて大きくなるかならないかは、一に懸って社会一般の受容の如何によっている。原子炉は数世紀に亘って危険な状態が続く永く生きている廃棄物を生み出す、1979年に、ペンシルヴァニア州スリー・マイル島で起った原子炉災害は、多くの人に原子力についての願望を、再考させる機会を与えた訳である。合衆国の西部地区の砂岩層中に眠っている可持埋蔵量約50万トンの酸化ウランは（1982年現在）稼動中のもの74、建設中のもの89の原子炉に動力を起させるに十分な量である。恐らくはこの状態で、世紀の転換まで十分にまかなえるであろう。また、約100万トンの酸化ウランがアイダホとフロリダの燐鉱床富鉱帯に存在しているし、更に低品位の燐灰石ならば、この外に500万トンが存在する。また例の黒色頁岩には、他に700万トンが含まれている。現在のところ、ウラニウムは、燐灰石からも頁岩からも採収されていないけれども、原子力の利用が拡大した将来においては、何らかの溶解による採取ないし抽出が実現されるであろう。



## 金 属 と 鉱 石

金属の探査は、金属を運んでくる鉱物（運鉱鉱物とも云う）を含む岩石を見付けることに懸っている。そしてその岩石から、金属が余り多くの困難と経費をかけることなく抽出できるものでなければならぬ。鉱山地質屋は、所謂鉱石を捜すが、それは、自然に発生し存在する原材料であって、採算的に採掘が可能なものでなければならぬ。（鉱石は、通常、金属を含むものであるが、といって必ずしも、常に含むとは限らない）。鉱物（又は岩石）が鉱石であると見なしうるかどうかは、その化学成分や、抽出可能な金属の比率および、その金属の市場価値によっている。例えば、赤鉄鉱という鉱物（化学式  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）はそれが重量比70%の鉄を含むので、良質の鉄鉱石となっている。褐鉄鉱 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) は、赤鉄鉱に較べて鉄の含有量が少く、そのために、それ程大規模には採掘されない。高い品位の金属を含有する鉱物であっても、金属を抽出することが極端に難かしいか、又は、その産地が市場から余りに遠く離れている様な場合には、鉱石とは言はれない。というのは、収益ということは、当然、鉱物

表 2 主 な 鉱 石 鉱 物

金 属	鉱 石 鉱 物	化 学 成 分
アルミニウム	ボーキサイト	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
クローム	クローム鉄鉱	$\text{FeCr}_2\text{O}_4$
銅	輝銅鉱	$\text{Cu}_2\text{S}$
〃	黄銅鉱	$\text{CuFeS}_2$
金	自然金	$\text{Au}$
鉄	赤鉄鉱	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
〃	磁鉄鉱	$\text{Fe}_3\text{O}_4$
鉛	方鉛鉱	$\text{PbS}$
マンガン	軟マンガン鉱	$\text{MnO}_2$
水 銀	辰 砂	$\text{HgS}$
ニッケル	硫鉄ニッケル鉱	$(\text{Fe}, \text{Ni})\text{S}$
銀	自然銀	$\text{Ag}$
〃	輝銀鉱	$\text{Ag}_2\text{S}$
錫	錫 石	$\text{SnO}_2$
ウラニウム	瀝青ウラン鉱	$\text{U}_3\text{O}_8$
〃	カルノー鉱	$\text{K}(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
亜 鉛	閃亜鉛鉱	$\text{ZnS}$

の定義の一部に含まれるからである。金属やそれを引出すのに必要な動力の値段が変動するにつれて、鉱物からの期待収益も、当然変動するからである。一般的な鉱石鉱物の一部を別表に掲げる（表2）。

## 金属鉱床の起源

### 火成岩に随伴する鉱石

結晶晶出作用は、初期晶出鉱物が、徐々に低温化する岩漿体の底で結晶化し、固定化するにつれて進行する。金属クロムは、盤状その他の貫入岩体の基底近くにあるクロム鉄鉱（の鉱体）から産出する。南アフリカでは、ブッシュフェルト複合岩体と呼ばれる、厚さ8 km長さ500kmの巨大な盤状貫入岩体があって、その基底近くに25枚にも及ぶクロム鉄鉱々層を含んでいるが、その層の中には2 mにも及ぶ厚さのものも含まれている。またクロム鉄鉱の上部には白金を豊富に含む同じような層が賦存する。世界中のクロムと白金の大半は、このたった一つの貫入岩から産出されている。モンタナ州では、スティール・ウォーター複合岩体と呼ばれている別の大きな先カンブリア時代の盤状貫入岩体があって、同様な、しかし幾分低品位の鉱床があって、これら二種類の金属（クロムと白金）を含んでいる。

熱水性流体は、最も重要な鉱石鉱床の源泉である。熱水などの流体はおそらく、マグマ自体の一部をなすものと思われるが、マグマの結晶化の最後の段階において、周囲の母岩に貫入したのである。銅だとか金などの金属の原子は、徐々に温度が下っていく深成岩体の中で次々に晶出する長石などの鉱物の結晶に入り込むことはないが、熱水が益々多くなっているマグマの中で次第に濃縮されていくようである。結局のところ、金属と珪素に富んだ熱溶液は（石英は所謂ボウエンの反応系列上では最も温度が下ったところで晶出する鉱物ということになっている）母岩の中に進入して鉱石鉱床を形成することになる。

熱水性流体の中の幾分かは、通常の地下水になり、深成岩体の熱によっておこる対流に入って循環する。水が深成岩体によって熱せられてくると、それは

上方に移動し、それに入れ替って側面から新たな水が引込まれることになる。それから新たな水も熱せられて上昇し、かくて冷却してゆく深成岩体とすれ違いに、とどまることのない水の循環が作動する。深成岩体の近くやそれにふれて動く熱水は、その岩体から金属を浸出させて上の方に運んでいき、随所に鉱石を沈積させるに至る。熱水溶液の形が如何ようであろうとも、それらが作り出す熱水鉱床には次の4つの一般的な形がある。(1) 接触變成鉱床, (2) 熱水鉱脈, (3) 鉱染鉱床, および (4) 温泉鉱床がそれである。

接触變成作用によって母岩中に発達する鉱石は、銅、鉛、亜鉛、銀などの金属を含んでいる。母岩は完全にか、さもなければ部分的に鉱石に転移するか交代させられている。このことは、特に石灰岩層に当てはまる。それは、実に容易に熱水溶液と反応するのである。こうして出来た鉱石の本体は実に大きくかつ実に鉱物に富んでいる。熱水系の鉱石の多くは金属の硫化物であり、時には不透明石英と混在することがある。硫黄の起源については、広く議論かなされている所である。

熱水鉱脈というのは、節理とか断層に沿って、細長く形成された鉱石体のことである。それらは、彼らの明らかな深成岩の源泉から大きく距ったところまで拡がるのが可能である。中には余りに遠く距っていて、果して深成岩と関連があるかどうか疑はしいものもある。流体は、裂け目に沿った空隙の中に、鉱石を沈澱させたり、母岩の裂け目を鉱石で置換する。熱水鉱脈で出来ている世界の大鉱床からは、鉛、亜鉛、銀、金、タングステン、錫、水銀と或程度の銅が産出する。

熱溶液は亦、鉱染鉱床を形成する。それには金属の硫化物を含む鉱石鉱物が、深成岩体の上部や内部にかけて巨大な容積をもつ岩石の中に極めて低い濃度で散布されている。世界の銅の大半は、鉱染鉱床から産出する(斑岩銅鉱床と呼ばれているが、それはこれに関連する深成岩体が通常は、斑岩状態—即ち岩石組織において、岩石の細粒組織の中に大きな斑晶を含む状態—にあるからである)。銅に随伴して多くの異種の金属、例えば鉛、亜鉛、モリブデン、銀および金(そして鉄も含むけれども、これは採算に合う程の量ではない)が沈積し

ている。

熱溶液が地球の表面に上ってくる場所には温泉ができる。陸地の温泉は多量の溶解した金属が含まれている。あるカリフォルニアの温泉のごときは、かなり多量の水銀を含んでいるので、その水は飲料には適しない。海底の温泉は一層印象的である。それは大きな山か丘ほどの金属硫化物を沈澱させている例があり時として充分に採算のとれる量になっている。海底温泉については、あとで、プレート・テクトニクスとの関係について考察する。

ペグマタイト（巨晶花こう岩とも呼ばれる）は、火成岩に関連する鉱石鉱床のもう一つの型である。これらには、リチウム、ベリリウムを含む鉱物と共に、エメラルドやサファイアといった宝石類の貴重な凝縮物が含まれる場合がある。

#### 地表の変化に基づく鉱石

化学的沈澱作用による成層は、鉄とマンガンに関する鉱石の最も普遍的な起源である。小数の銅鉱石も同じくこの方法で形成される。縞状鉄鉱層は、通常、鉄の鉱物とチャートとの互層からできているが、世界中至る所で、先カンブリア代に、明らかに浅い水の溜った盆状地の中に、堆積岩として作られたものである。その後の褶曲や断層や変成作用および溶解作用で鉱石の初めの形の多くは壊されてしまったので、鉱石の起源ということを説明することは極めて困難である。水は真水か海水かいずれか、鉄は火山活動によるかあるいは周囲の大陸の深層風化によるかという訳である。その互層はある周期的な変動によって、火山活動や、河の流水、盆状地の水循環、有特体の成長など数々の要因によって創造されたものであろう。縞状鉄鉱層は凡て、先カンブリア代のものである。おそらくその起源は、化学的に今日のものと異っていた古代の大気や海洋と関連しているであろう。

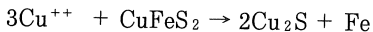
漂砂鉱床というものが、流水や波浪が、川の砂州や海浜で多量の堆積砂粒を集積した様な場所で見受けられる。この様にして集められた砂粒には、金の小塊や砂金、自然白金、ダイヤモンドなどの宝石、および、重たいチタンや錫の酸化物を含む角の丸くなった小石や砂粒が含まれている。

風化作用による濃縮もいろんな型で起る。ダイヤモンドは、ダイヤモンド・

パイプと呼ばれる筒状の鉍体や、上部マントルから上ってきた角礫状の超塩基性岩の柱状体を通して地表に運ばれてくる。ダイヤモンドは、始めそれが出来た時は、広くダイヤモンド・パイプの中に散布されていた。地表部分で、パイプ中の超塩基性岩石は、風化され侵蝕されたであろう。ダイヤモンドは風化作用に対して、かなり抵抗力をもっているものであとに残り、パイプの頂上部に豊富な鉍床として濃縮されたものである。南アフリカ共和国の例に見られるように、川が漂砂鉍床の中にダイヤモンドを再度配分しなおしたものと言えよう。

ボーキサイトは、最も重要なアルミニウムの鉍床であるが、熱帯性気候の中の紅土化作用的風化現象、特にアルミニウムに富んだ岩石に対しての風化によって形成される。熱帯の高温多雨の気象条件の下で、多くの風化生成物は、珪酸土に至るまで、溶け易くなっている。最も溶けにくい生産物がアルミニウム酸化物であって、風化作用を受けた岩石の上に残って、アルミニウムに富む土壌の中にボーサイトを形成する。ダイヤモンドと同様に、アルミニウムも、他の凡ての成分が除去されることによって、残渣として濃縮されたものである。ニッケル鉍も同様にして、紅土（ラテライト）の中に形成される。

風化作用に伴う濃縮現象の別の型として、鉍染鉍床についての浅成富化作用というものがある。鉍染銅鉍床中の主要な鉍石鉍物は、黄銅鉍と言い、約35%の銅を含む銅と鉄の硫化物である。地表近くにおいて、下方に流れる地下水は鉍石から銅と硫黄を溶脱させ、あとに鉄分を残す。地下水面より深いところで溶解した銅は、鉍染鉍床の低部にある黄銅鉍に反応して、例えば輝銅鉍のような、銅分約80%の富鉍鉍物を形成する。



地下水に  
溶けた銅      黄銅鉍      輝銅鉍      溶液中の鉄

この様にして銅は、鉍床の頂上部から移動させられて、もっと低い部分に付加される。地下水位以下に存在する鉍石は、鉍床の残りの部分におけるよりも、数倍も富鉍化しているであろう（銀も銅とともに移動することができる）。地表に残された鉄は、焼けと呼ばれる錆びた帽子岩を形成するが、これは下部に

潜む鉱石の肉眼で見分ける手がかりになる。

### 金属鉱石とプレート・テクトニクス

最近、鉱産物の分布とプレート・テクトニクスの関係について、多くの関心が集まっている。プレートの分裂(付加)境界は、しばしば、温泉を連ねる線によって示される、その温泉が、金属を運んで来て沈澱させることになる。小型潜航艇に地質学者達が乗って、これまで、中央海嶺上の地溝帯に沿って、数々の場所で、温泉を観測してきた。その種の温泉は、地溝帯の中の、高熱流と玄武岩質の熔岩によってひき起されるが、温度で摂氏約20度から推定350度に至る間を変動する。

熱水が地溝帯の中で浮び上るにつれて、冷水がそれに代って、横側から引入られる。これで循環の型ができるが、その途中に於て冷たい海水は、海嶺の側面を構成する玄武岩質地殻中の亀裂を通して、実際に下方に引き入れられる、それから暫らくは水平に動いて地溝帯の方に出て、そこで加熱された後に、再び海洋底に戻ってくる。海水が地殻の中を移動する時に、それは地殻を構成する岩石や熔岩から金属と硫黄を溶解する。熱せられた金属を富豊に溶かした溶液が冷い海水に接触すると、金属硫化物は、温泉の周りに築山のように沈澱する。こうした経過は、太平洋に於いて度々撮映されており、ある温泉が吹き出す雲の様な粒状の鉱石鉱物は、さながら黒い煙を見るようであったといわれる。

地溝帯にある温泉中に賦存する金属は、鉄と銅と亜鉛に富んでおり、若干量を減らしてマンガン、金、銀などが伴っている。築山の様に堆積したものは、大方固体の金属硫化物であるが、それらは細かいものであり、かつ広い範囲に亘って海洋底に散布しているので、それらを営利的に採掘することは、実現しないであろう。時として、鉱石が良質の鉱床として濃縮されている場合がある。紅海の海底には、数十億ドルの価値をもつ金属堆積物が、温泉溶液で一杯に満された盆状地の中に沈澱している。その溶液は温度が高い(摂氏60度に及ぶ)のであるが、それらは塩分濃度が高いために、極めて濃厚でもある(海水にく

らべて7倍の塩分を含んでいる)。紅海の塩水も非常に濃いので、上層の海水と混じることなく、海洋底中の低地に集っている。

高温の金属溶液は、同じく大陸部プレートの分裂(付加)境界近くでも見かけることがある。中央海嶺内陸部の延長にあたる、南カリフォルニアのサルトン・シーの近くでは、紅海の塩水に極めて類似した塩水が地下で発見されている。熱水は最近、地熱発電所の運転に使用されている。塩分や金属を多く含む成分は施設に対して腐蝕作用をもっているが、銅や銀などの金属は、いつかは、有用な副産物として回収されるであろう。

海洋底拡大作用は、海嶺頂上部から金属鉱石を運び出し、おそらくは、プレートの収束境界において島弧または大陸の下に沈み込むことになる。陸上部におけるオフィオライトの裂片には、比較的元のままの形でこれらの、豊富な鉱石鉱床が見受けられる。そのような鉱石の著名な例として、地中海のキプロス島があげられる。縞模様をしたクロム鉄鉱床が、オフィオライトの底部の蚊紋岩化した超塩基性岩石に含まれている。

島弧でおこる火山活動もまた、安山岩質火山の側面に温水鉱床を形成する。袋状の極めて良質の鉱石が熔岩体の局部に近く集まることもある。鉱石はまた時には浅い盆状地中に堆積岩状に層をなして分布することもある。熱水の循環や鉱石形成の過程は、海洋底拡大作用の中心部の過程と全く類似している。し

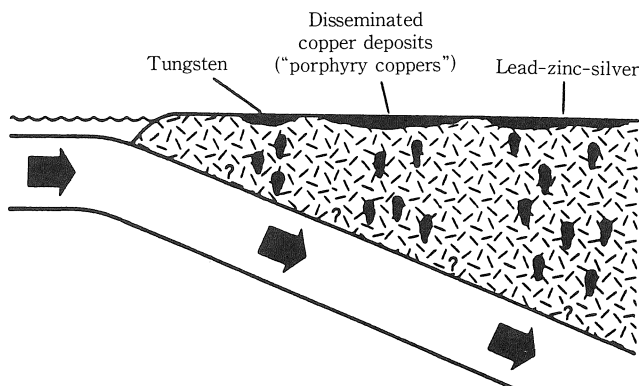


図 5 合衆国西部の鉱石帯と沈み込み帯の深度の関係

かし島弧に産出する鉍石には通常、鉛が各量に含まれていることは注目に値する。カナダの先カンブリア時代に属する楕状地にある亀裂のある火山岩を蔽う良質の塊状硫化鉄鉍床は、この様子経過を経て、古い島弧の上に形造られたものであろう。

海洋底が大陸の下に沈み込むために、大陸の縁辺に幅の広い金属鉍物の鉍床帯が生まれる。図5に示すように合衆国西部における金属分布もプレートの沈み込み帯の深度に関係があろう。鉍石分布帯の型は、沈み込み角度の変化や、走向移動断層や、脊弧の拡がりによって、多分に攪乱されるだろう。同じ類型の鉍石分布帯は他の沈み込みと関係のある山脈、特にアンデス山脈において顕著に表われている。

沈み込み帯の上部にある大陸系鉍石群の起源は必ずしも明瞭ではない。山頂部からの温泉鉍床は一度大陸地殻に沈み込み、さらに上部の大陸部に上昇するために再移動することもある。鉍石はおそらく、下降する海洋地殻や上部マントルの残余の部分を蒸溜して出来たものであろう。金属もまた、大陸地殻自身か、或はその下のアセノスフェア（岩流圏）に由来するものであろう。金属は多少とも、上昇するどろどろとした熔岩とか、それと関係のある熱水循環の熱の作用によって濃縮させられるものと思われる。

マントルプルーム（マントル深部から生ずるマグマの上昇流）が鉍石の濃縮を起すのは、それが大陸部の下に上ってきた時である、というのはプルームこそは、熔岩の源泉や、熱水循環を造り出しているからだと考えたい。ミシシッピ・バレー型鉛・亜鉛鉍床は大陸内部にあって、随分とややこしい特性をもっている。広い面積に亘る金属鉍床が石灰岩やドロマイトの中に、洞穴充填や交代作用によって胚胎し、鉍石と、火成岩との間に、何ら明白なつながりが見つからない、火成岩が鉍石分布範囲に見当らない状態である。この鉍石の起源に関する多くの假説の一つは、マントル・プルームの直上に大陸が移動してきたというものである。この假説に対しては少くとも二つの議論がある。一つは、マントル・プルームは大量の火山岩を噴出する筈であるが、ミシシッピ・バレー鉍床と関係のありそうな火山が存在しないこと、もう一つは、イエロース



トーン国立公園の下部の様な、今日プルूमの存在が確実視される場所が、実は鉱物鉱床の存在の可能性が極めて少ないということである。

## 採 鉱 法

採鉱は地球の表面又は地下において営まれる。地表での採鉱の二つの様式の一つは、剥土採鉱法であって、或種の炭層の採掘に用いられている。もう一つは、露天採鉱法と呼べるべきもので、鉱石は大きな掘り穴の中で露出される。地質学者の中には、剥土採鉱法と露天採鉱法を交代可能なものとして使用する人がいる。しかし、剥土法とは、一般に石炭その他の資源を長く帯びも状に露出させ、あとでそれを埋め戻すことである。一方露天採鉱法とは、おおよそ円形をしており、大量の原料物質を引出すために掘さくすることである。後者は通常埋め戻すことはない。漂砂採鉱法とは、地表での採鉱法であるが、川の砂州や海辺の鉱床から、有用な沈澱粒子を採取することである。

### 環境への影響

採鉱業に関係する環境問題のうち幾らかは、充分の注意が払われれば、部分的には解決することができる。例えば過去において、ボタ山とはいえば、きまって、見苦しいゴミの山であり、ゴミ投げ捨て場として放置されていた。剥土採鉱法や漂砂採鉱法の採掘跡は廃石（ボタ石）で埋め戻し、地ならしをし格好を整えて、表土でそのうえを蔽って、その土地を使用可能な状態に回復させることができる。露頭部（地表で鉱石が現われている場所）が、採掘作業終了後2年ないし3年のうちに埋立地に造成された例がいくつか知られている。露天掘りで規模が大きい場合は、埋め戻しはなかなかむづかしい、というのは採掘作業が進行中に逐次埋め戻すということが出来難いからである。地下採掘法は往々にして廃石（ズリ石ともいう）で埋め戻される場合があり、これによって、鉱石採掘終了後に、地表が沈下するのを防ぐことができる。埋め戻しが充分でなくて大きな沈下を来した例がいくつかある。

さらに処理し難い問題の一つは、鉱山の酸性廃水の問題である。これは坑内

水の流出あるいは坑内水の汲みあげによって起こされる。硫化鉱物はこの種の事件の原因となることが多い。坑内水は硫化物のいくらかを溶解し、さらに空気にふれ酸化して、硫酸を作る。ある鉱山では、排水を管理し酸性を中和するための計画に可成りの終費をかけて、地表水の汚染や森林および野生動物への被害を回避した例がある。一番困った問題は、永く放置され、今なお酸性の水が流出している廃鉱に関するものである。これらの多くは酸性を中和することも出来ない場合が多い。

金 属 鉱 物 (略)

非 金 属 鉱 物 (略)

#### 資源代替、再生利用および省資源

多くの地球資源の代替品が現に存在しているし、他にも見出されるであろう。アルミニウムは多くの電気的使用法、特に伝送線路において、より高価な銅にとって代わることができる。ガラス繊維も、電話線に使う銅の代りをする。アルミニウムと錫を塗った鋼（はがね）は実質的に飲料容置と交換可能である。綿糸と羊毛の用途は増えて、衣料の分野においては、ポリエステルその他の石油系合成繊維に置き換わっている。

しかし、ある種の資源については、適当な代用品が見込めない状態である。未開発の分野、即ち橋梁における鉄鋼や寒暖計における水銀を代替する類のものは未だ判っていない。コバルトも強力な永久磁石には欠くことのできないのである。代用品はある資源の供給寿命を延ばすことは出来ても、多くのその他のものの代用はできないのである。

再生利用は、ある種の資源供給を増大させる手助けになる。しかしどの資源も、供給量の半分ですら、再生利用によって受けるものはないのである。公共分野に於て増えてくる自発的再生利用とか、都会のごみ屑からの廃品回収などは、この比率を高めることになるだろう。しかし、新しい鉱石は常に必要とな

る。というのは、製品のある種の使い方によっては、その原材料の再生を可能にさせないことがあるからである。道ばたで、錆びて減っていく鋼製の罐は再生利用され得ない。酸化鉄は極めて低い比率ながら土壤中に散乱し、決して再生できない。石油とか石炭のような多くの資源も亦、使うに従って消費されて再生利用することは出来ない。

希小資源の保護、節約は特に重要である。合衆国の石油消費量は1979年以来減少してきたがこれは、1時間55マイルへの速度制限や、燃比の良い自動車や、建築物の断熱性の向上や、不必要な光熱使用の廃止という様な節約努力の結果である。これから先の困難な時代において合衆国が石油基盤経済から他の燃料を基盤とする経済へと変っていくにつれて、燃料節約の必要性に幾変となく迫られるだろう。金属の節約、特に大量輸入する金属の節約は、益々重要になって行く。より小型の車や、より持ちのよい家具などは、金属の節約に大変大きな助けとなる。

## 将 来 の 展 望

海洋底採掘は、今でこそ珍しいが、それに加えて海底石油掘削も、近い将来大いに増加するだろう。マンガン団塊を深海底から採鉱することによって、多量の銅ならびにニッケルが、さらには合衆国の製造工業が消費できるよりもはるかに多くのマンガンが合衆国に供給されるであろう。多くの団塊の銅含有量は、陸上部の上質の銅鉱床よりも1ないし2%ぐらい高いものである。紅海型の金属含有塩水や鉱床が、将来は数種の金属の供給源になるとも考えられる。

いろいろの道具類が陸上での鉱物探査の手助けとなる。高度に発達した、土壤及び土壤ガスについての地球化学的試験が地下に賦在する鉱体を指摘してくれるだろう。地球物理学の技術は、資源探査の精度を高めてくれる。地球資源探査衛星ランドサットは、多くの違う波長のエネルギーで地球表面を撮影し、その衛星画像を注意深く解析することが探鉱への大きな協力となることが判ってくる。ランドサット計画の経済的効果が、その費用をはるかに凌駕するに至

るであろう。

金属や石油などの資源の分布に、プレート・テクトニクスが関与する状況が一層明らかになるにつれて、これらの金属を探すための探査対象地域の選定が、一層容易になるにちがいない。(以上)

(付 言)

これは、下記の図書(全22章)のうち、Geologic Resource(第21章)を訳出したものである

Physical Geology                      Third Edition  
by Charles C Plummer  
David McGeary  
California State University  
Sacramento

本書は、内容の構成上、理論地質学というべきものである。訳出した地質資源という用語については、日本では通常用いられていない用語であるが、本文において著者が「地質学的現象に起因する有用物質であって、地球から抽出するもの」と定義した意味合いに於いて、適当と思い敢えて直訳のまま用いることにした。

資源の立場から云えば、地球資源を2つに分けて、地質資源と生物資源と呼ぶことが可能であり、それぞれ、地球上の岩石圏と生物圏から得られる資源と定義して良いであろう。

訳出に当っては、とくに学生諸君のことを意識して、簡明を旨としたつもりであったが、至らざる所のみ多く自戒している。最後に、本訳出作業に当って、終始、御懇篤なる御指導を賜った本学、経済学部長梶谷正光先生に対して、衷心から感謝の意を表したい。