

# 花崗岩地域の潜頭鉍床探査技術開発 (1)

## グライゼン型スズ-タングステン鉍床について

石原 舜三・小笠原 正継・中嶋 輝允 (鉍床部)  
Shunso ISHIHARA・Masatsugu OGASAWARA・Terumasa NAKAJIMA

### 1. まえがき

鉍物資源の開発利用は自然の露頭から始まる。我が国の代表的鉍床である足尾 (Cu 古河) 別子 (Cu 住友) 日立 (Cu 日鉱) 吉岡 (Cu 三菱) 神岡 (Pb, 三井) 釜石 (Fe, Cu 日鉄) などは露出する鉍床の採掘に始まり 周辺にいくつもの鉍床を発見して発展してきた。

開発が進み鉍量が枯渇すると当然のことながら潜頭性の新鉍床へ期待が寄せられる。潜頭鉍床の発見で最も著しい業績をあげた分野は 1960 年代の黒鉍鉍床であろう。北秋田の北鹿地域を中心に 小坂内の岱 (1959-60 年) 釈迦内 (1962年) 松峯 (1963年) 小坂上向 (1963年) 松木 (1964年) 深沢 (1969年) などが地表下数 100m 以深で 次々に発見された。

黒鉍鉍床におけるこれら業績はこの種の鉍床が層準規制をうけており 層準追跡と言う極めて決定的な探査手法が確立している事実を背景にしている。また鉍床が水平的にかなり広く数 100m 以上の範囲に展開する性質も一助となっている。一方 幅数m以下の垂直に分布する鉍脈が地下数 100m に潜在する場合は その捕捉が極めて難しい。あらゆる成因的背景を詳細に吟味した きめ細かい探査技術が求められる。

この様な困難さを背景にした鉍床タイプのなかで 花崗岩地帯のスズ-タングステン-レアメタルなどの鉍床についてはその探査システムの確立に光明が差しかけているように見える。その理由は(i)長年の岩石化学的研究によって鉍床を伴う花崗岩の性質がかなりはっきりとしている (ii)鉍床が花崗岩体頂部からの上方近傍に存在するため 潜在花崗岩体探査が即鉍床探査に結びつく利点がある などである。

ここでは最近の研究をかえりみながら 花崗岩地帯の潜頭鉍床の探査技術 とくにグライゼン型スズ-タングステン鉍床の場合について考えてみたい。そして昨年度から開始された金属鉍業事業団による「希少金属鉍物資源の賦存状況調査」(金属鉍業事業団 広域調査課 1986) の一助としたい。

なおこの小文は下記の成因的背景 (Ishihara, 1981) を基調としていることをおことわりしておきたい。

(i) 主要なスズ-タングステン鉍床はグライゼン化を伴

う花崗岩に由来する。したがって (ii) F, Rb, Li などに富むチタン鉄鉍系 (S, I タイプどちらでも良い。Sr 初生値は一般に高い) 花崗岩質マグマの分化相に鉍床は伴われる。以上から日本の場合に 棚倉破砕帯以西の白亜紀花崗岩類の分布する西南日本内帯が考察の主対象となる。

タングステン鉍床には北上山地の様に I タイプ磁鉄鉍系または中間系列に伴われる鉍床があるが これには別の探査システムの確立が必要である。また阿武隈山地花崗岩類は両二者の中間的であり これにも独自の探査システムの確立が必要と考えられる。

上記に立脚すると スズ-タングステン潜頭鉍床の探査には 中-古生層などの被貫入岩が残存している地域でそのような花崗岩体の上面の形を描き出すことがまず必要である。実例をまず概観してみよう。

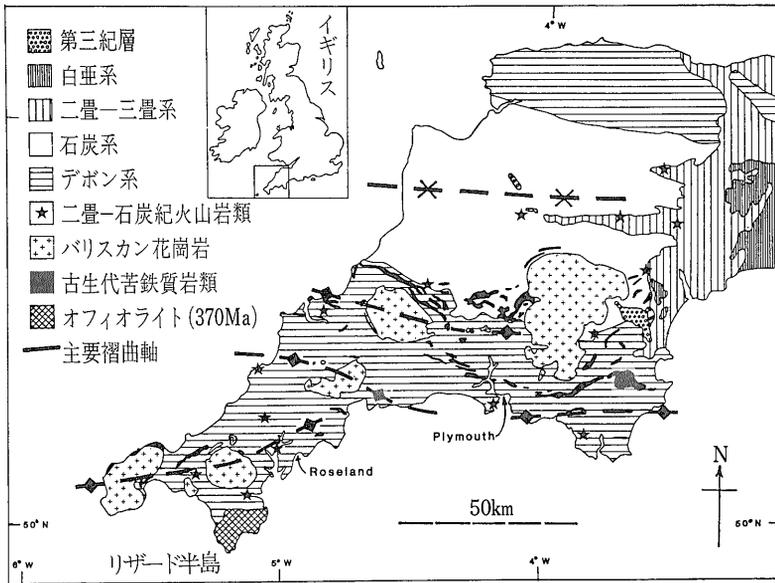
### 2. 実例の紹介

潜頭鉍床の発見は一般的には探査活動の活発さに比例する。したがって一国の鉍業の歴史の長さにも比例すると言えるかも知れない。また 社会主義国では国策として鉍物資源探査を行うから 目先の利益に捕われず基礎的調査を積み上げており 潜頭鉍床の発見の素地が整っている。

タングステンは第一次世界大戦以後 その利用が始まったが スズは14世紀以前から生活に活用されておりヨーロッパに古典的なスズ鉍産地帯がある。ヨーロッパ南部のイングランド南西部やエルツゲビルゲなどである。特にエルツゲビルゲは 14-18 世紀にわたり 鉍工業の分野で世界の先導的地位を確保した (清水, 1977)。共にパリスカン期 (上部石炭紀-二疊紀) の S タイプチタン鉄鉍系花崗岩活動に伴われる鉍脈型スズ鉍床を主体とする。

#### イングランド南西部

この地方の鉍床はコーンソビア半島の先端部にあり コーニッシュ型スズ鉍床として知られている。主として鉍脈型鉍床が花崗岩体の内外に 上下 1 km 以上に亘って採掘されており 主要対象鉍種はスズであるが周辺鉍床群を含めると下記の多量鉍物資源を供給しており



第1図  
イングランド南西部の地質概要  
(Hawkes, 1984) 原図. 背斜  
軸に花崗岩が貫入する点に注目

この地方が一大鉱産地帯であることがわかる。

Sn	250万トン	鉄鉱 (赤鉄鉱+菱鉄鉱)	200万トン
Cu	200	重晶石	50
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25	黄鉄鉱	15
Pb	25	マンガン鉱	10
Zn	2.5	F	1
WO <sub>3</sub>	0.6	カオリン	9700
U, Ag, Sb, Co, Ni 鉱			0.6

Hawkes (1984) による

コーンヌビア半島は基本的には古生代堆積岩類からなる (第1図)。最下位のデボン系は砂岩 頁岩にリーフ石灰岩を伴う海成層である。これらには火山岩類も挟まれ特に上部デボン系には枕状溶岩を伴う玄武岩類が伴われる。デボン紀末期には東北東-西南西方向に直交する方向で地殻の第1期圧縮化があり同方向の褶曲軸が発達すると共にリザード半島のオフィオライト岩体が北方へ衝上した。

石炭系は主に海成頁岩 薄い石灰岩 砂岩を挟む下部層と 砂岩・頁岩のタービダイトからなる上部層からなる。この間に第2期の褶曲 火成活動がある。石炭系の堆積後この地域の主要な第3期の構造運動があった。これがパリスカン造山運動と呼ばれるもので 東-西軸の複背斜を南部に 大きな向斜構造を北部に生じている。また古生層は緑色片岩相に至る広域変成作用を蒙っており これら変成岩類は 370-350Ma 345-325Ma 315-275MaのK-Ar雲母年代を示す(Hawkes, 1984)。

1986年10月号

花崗岩活動は変形 変成作用後に生じたもので K-Ar 雲母年代は310-260Maを示す。花崗岩はかなり広く露出し 最大のダートモア岩体は露出面積625km<sup>2</sup> これは北上山地で最大の遠野岩体 (615km<sup>2</sup>) より大きい。他の主要岩体は100-200km<sup>2</sup>の規模を持ち 11個の衛星岩体は8 km<sup>2</sup>以下である (第2図)。

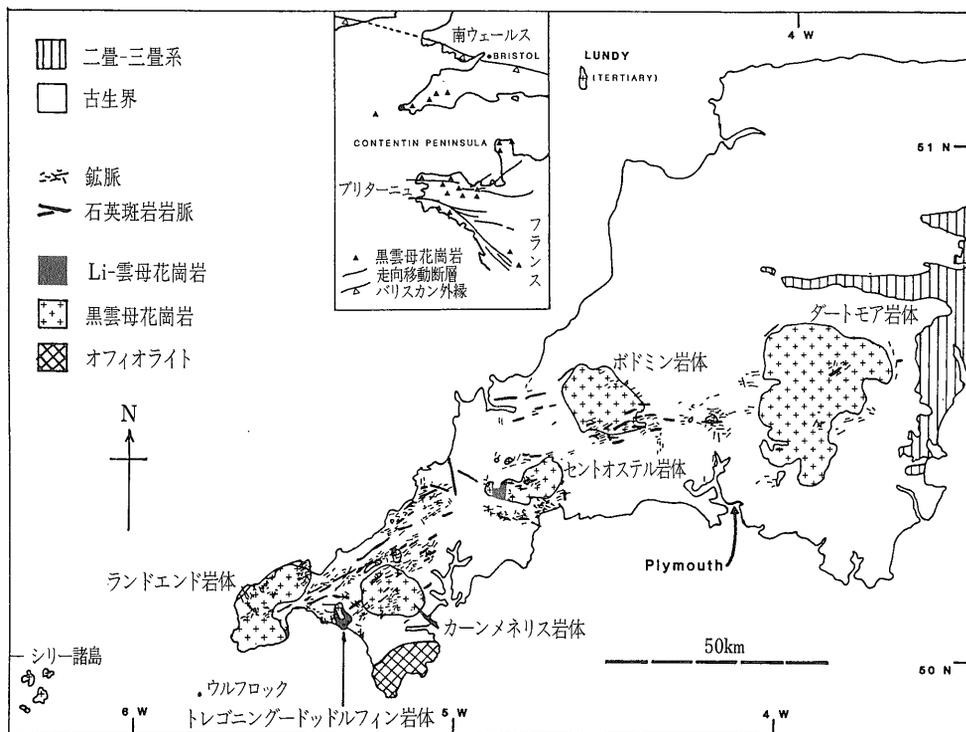
花崗岩はほぼ全域に亘ってカリウム長石の巨晶を持つ粗粒黒雲母花崗岩である。ルーフの近くや周縁部に細粒相があらわれる。セントオステルなどの2岩体では等粒のLi雲母花崗岩が小規模に産出する (第2図)。これは岩脈としても産出する。この花崗岩はLi, B, Fなどに富む残液が黒雲母花崗岩の一部を比較的浅所で再溶解させ 生じたものと考えられている (Hawkes, 1984)。

花崗岩はSiO<sub>2</sub> 70-74% K<sub>2</sub>O 5-6% 雲母類は約5% 電気石 (<1%) やトパズで特徴づけられる。したがって微量成分としてのF, B, Liなどに富んでいる。このような特徴は世界各地の主要スズ鉱床帯でみられるもので (Ishihara, 1981) ここでは詳述しない。Li 雲母花崗岩となると この特徴はさらにはっきりする (第1表)。

鉱脈は一般に堆積岩の褶曲軸に平行な走向を有し 急傾斜 花崗岩や近傍の堆積岩類中に分布する。

### エルツゲビルゲ

この地方の鉱脈もパリスカン期の同様な花崗岩類に伴われており 被貫入岩類に先カンブリア紀変成岩が含まれる点が異なる。これら被貫入岩類は北東-南西方向に一大背斜構造を持ち ここでもイングランド南西部と同様に背斜部へ花崗岩が貫入している。エルツゲビル



第2図 イングランド南西部の花崗岩 鉍脈などの分布 (Hawkes, 1984 原図)

ゲの地質と鉍床についてはかつて本誌に紹介したことがある (石原 1975)。ここでは下記の若干の点について注意を喚起しておきたい。

エルツゲビルゲでは第3図に示すように 潜在する花

第1表 イングランド南西部の鉍化関係花崗岩の化学的性質

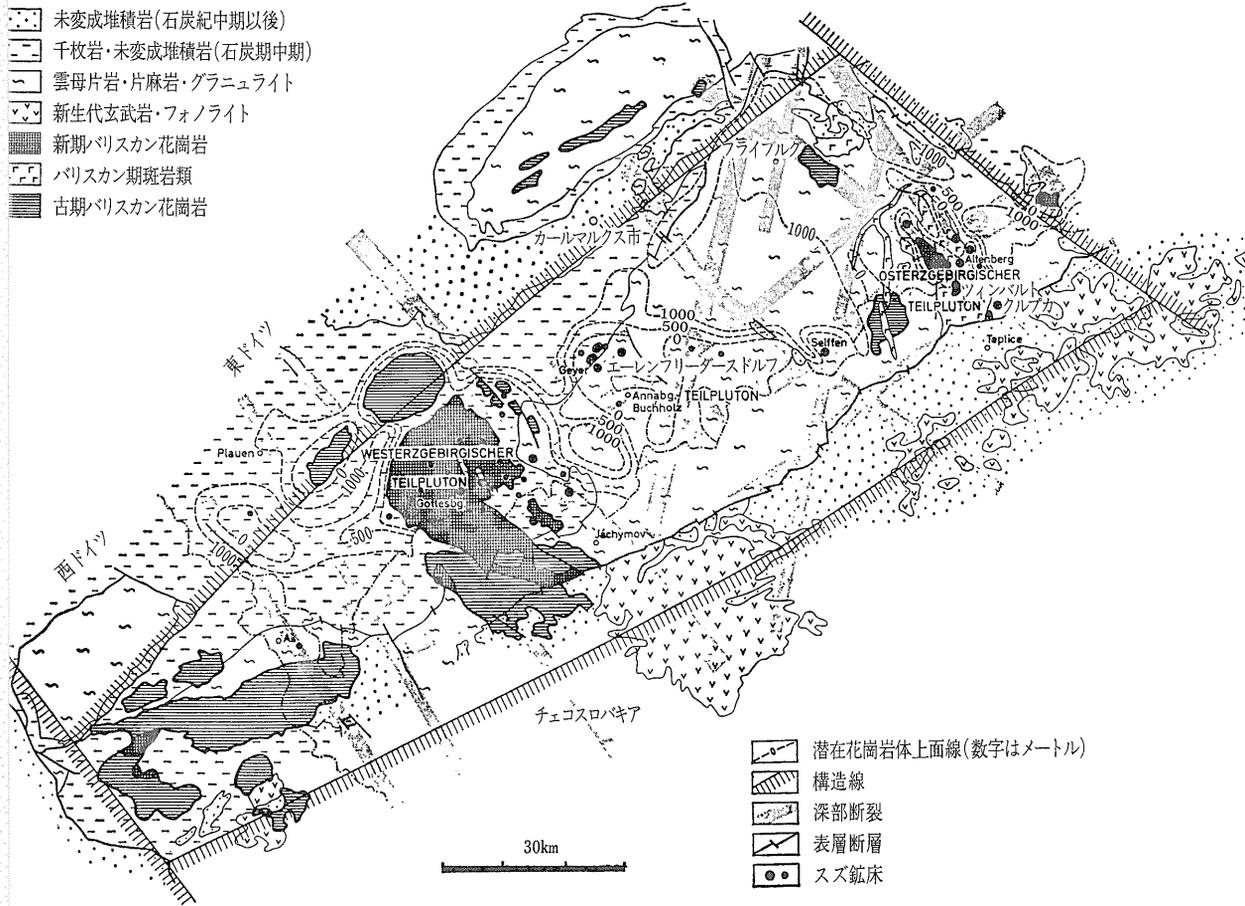
	黒雲母花崗岩	Li雲母花崗岩
SiO <sub>2</sub> (%)	70-74	71-72%
K <sub>2</sub> O	5-6	4
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.8	1
モル Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /(K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O+CaO)	1.1-1.2	1.3-1.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO)	0.25	0.4
F (ppm)	3,000	15,000
Li	250	1,500-7,000
B	500	1,200
Be	15	40
Sn	10	10
W	未測定	未測定
La	50	2
Ta	5	25
Nb	25	45
Rb/Sr	1-15	15-30

(Hawkes, 1984)

崗岩体の上面が描き出されている。この図の等高線は1964年の色刷り地質図に基づくがその後の追加ボーリングでも大勢に変更はないとのことである (G. Tischendorf, 私信 1986年)。同様に歴史が古いイングランド南西部では 堆積岩中の鉍床近くでは花崗岩の形態は知られているものの 全域的な形はまだ調べられていない。

エルツゲビルゲでは花崗岩の突起部がわかると集中的に探査する。クルプカ (Sn) やエーレンフリーダースドルフ (W) などの鉍床はその様にして発見された潜頭性の鉍床である。エーレンフリーダースドルフの鉍脈は地表下約 200mの花崗岩体のリッジと平行に その上方に発達している。後述の高取鉍床の下部にも同様な状況がみられるのではなからうかと筆者らは考えている。

花崗岩体突起部 (キューボラ) は常に金属鉍化作用を伴うわけではない。ある場合には全く不毛であるが アルカリに富む各種の優白色花崗岩は存在するために 非金属鉍物資源としての有用性が生じることもある (石原 1975)。そのため花崗岩の形を描く作業は非常に重要な価値がある。



第3図 エルツゲビルゲの花崗岩類 スズ鉱床などの分布 (Tischendorf et al. 1971原図)。花崗岩が深度1kmまでわかっている点に注目

江西省南部

この地域には世界的に著名な西華山などのタングステン鉱脈鉱床がある(佐藤 1982, 石原 1983)。この鉱床地帯もエルツゲビルゲと同様に隆起帯に当り 弱い変成作用を受けたフリッシュ型砂岩・頁岩層に燕山期黒雲母花崗岩が貫入する。被貫入岩類は主に下部古生代に属し カレドニア変動による東西方向の圧縮により北々東方向のゆるく開いた2つの向斜構造(第4図)と西へ傾倒するタイトな背斜構造とを示す。また4-5km間隔に東西系の剪断帯を形成し これが燕山期の重要な鉱脈形成の場となる。

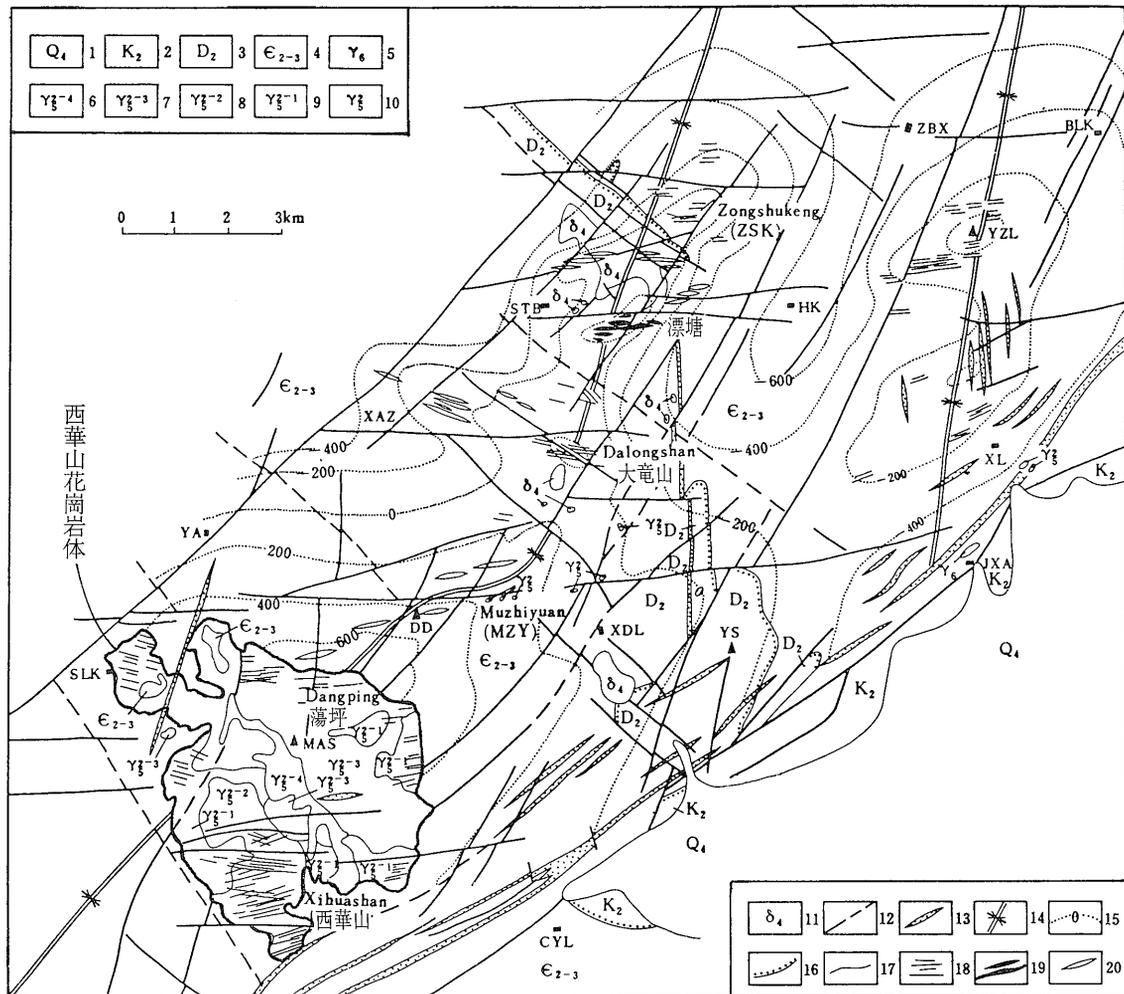
鉱化関係火成岩は燕山期黒雲母花崗岩(184-140Ma)であり 露出部分は20km<sup>2</sup>にすぎないが 地下では200km<sup>2</sup>以上のバソリスであることが知られている。露出する西華山岩体は南西側で急傾斜 北々東方へ緩傾斜で潜在する。花崗岩は古生層の向斜軸沿いに2つのリッジを持って北々東方向へ伸長し 共に鉱床を伴うが 西側の主

要な西華山-漂塘リッジが重要な鉱床を胚胎する(Yang & Lu, 1962)。

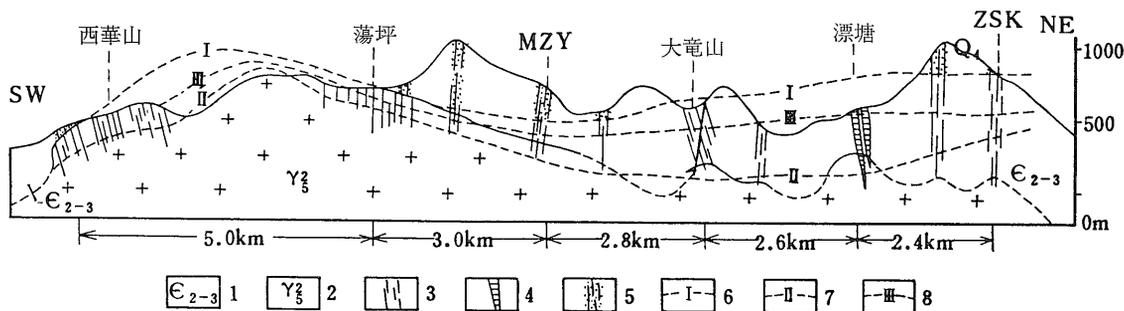
堆積岩中の鉱床は北々東方へ3.0 2.8 2.6 2.4kmのほぼ等間隔に分布し いずれも潜在花崗岩岩体の突起部 とくに大竜山 漂塘などの大規模鉱床は大きな突起部直上に産出する。鉱化帯の上下幅は花崗岩中の西華山鉱床で150m 前後であり 北々東方へ花崗岩体を離れるに従い大きくなり 最大500-800mに及ぶ。鉱化帯の中心もそれに従って離れ 潜在岩体の上面から最大500mに達するが 一般に高品位部の部分は上面から200-400mである(第5図)。

シホテアリン

シホテアリン南部の堆積岩中のグライゼン型スズ鉱床については かつて本誌に紹介したことがある(石原 1980)。ここでは潜在花崗岩体がボーリングで発見されているドブロフスク鉱床について注意を喚起しておきたい



第4図 西華山-漂塘付近の地質構造図(Yang & Lu, 1982原図). 1. 完新世 2. 上部白亜系 3. 中部デボン系 4. 中-上部カンブリア系 5. ヒマラヤ期花崗岩類 6. 早燕山期花崗斑岩 (IV 亜期) 7. [ ] 斑状細粒黒雲母花崗岩 (III 亜期) 8. 同 中-粗粒黒雲母花崗岩 (II 亜期) 9. 同 斑状中粒黒雲母花崗岩 (I 亜期) 10. 同 細粒黒雲母花崗岩 11. パリスカン石英閃緑岩 12. 断層 13. 珪化割目帯 14. 向斜軸 15. 潜在花崗岩体上面等高線 16. 不整合面 17. 地質境界 18. 鉞脈 19. 網状鉞体 20. 微鉞地



第5図 西華山-漂塘地質断面図 (Yang & Lu, 原図). 1. 中-上部カンブリア系 2. 早燕山期黒雲母花崗岩 3. 鉞脈 4. 網状鉞体 5. 鉞微地 6. 稜行鉞床上限 7. 同 下限 8. 富鉞部の位置

この鉱床では潜在花崗岩体から上位 150m の堆積岩類はグライゼン化しており 黒雲母ホルンフェルスは更にその上位 200m に産出する。 鉱化作用はホルンフェルスの上限付近 すなわち花崗岩から 350m 付近で最も良く 上下に低品位となる 潜在花崗岩はここでも白雲母を含む黒雲母花崗岩である。

まとめ

以上のようにグライゼン型 スズ-タングステン 鉱床は一般に隆起帯の花崗岩類に伴われ その花崗岩は被貫入堆積岩類の背斜軸に沿って貫入している。 江西省南部ではゆるい向斜と急倒する背斜軸からなる地域に貫入し若干様子が異なる。 我が国では京都府の大谷・鐘打鉱床で背斜軸に貫入しており 山口県玖珂地域ではまだよくわかっていない。

鉱化火成岩は基本的には斑状黒雲母花崗岩であるが多少とも白雲母を伴う。 古い時代ほど粗粒で かつパリスカン期には Li 雲母が特に多く 一部には Li 雲母 花崗岩もみられる。 イングランド南西部では電気石が特徴的である。 トバズや螢石が一般的で 花崗岩の F 含有量は地域を問わず高い。

鉱床はこのような花崗岩突起部とその周辺に胚胎しスズ-タングステンの鉱化範囲は花崗岩体から500m以下の範囲と考えられる。 非グライゼン型鉱化はこれより遠くまで及ぶ可能性がある。

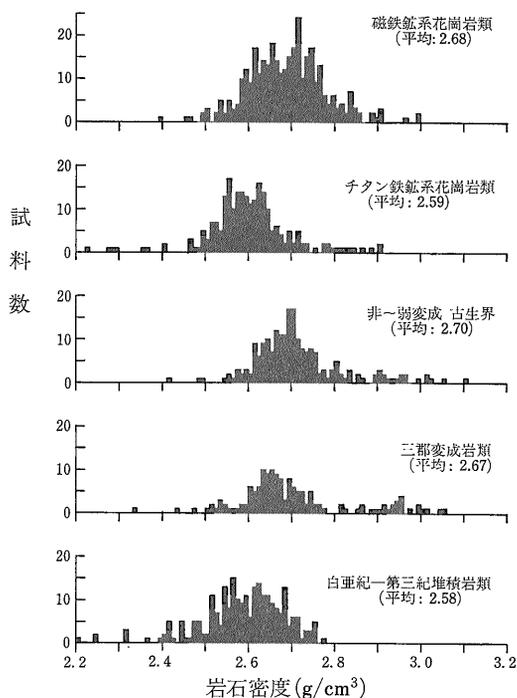
3. 重力探査による潜在花崗岩体の推定

実例で示されたように 鉱床の位置が花崗岩体の形態と密接に関連していることから 鉱床探査 特に潜頭鉱床の探査にとって花崗岩体の位置・地下構造を求めることが重要である。 そのため 物理探査手法により潜在花崗岩体の位置・形態の推定が行われる。

スズ-タングステン鉱床の形成に 関係した チタン鉄鉱系花崗岩の帯磁率は低く (Ishihara, 1981). また貫入をうける堆積岩・変成岩も一般に同様な値を示す そのためチタン鉄鉱系花崗岩体を磁気探査の結果から判別することは困難である。 磁鉄鉱系花崗岩体が磁気探査の結果から容易に判別できることと対照をなす。

これに対して 花崗岩と母岩の密度差から生じる重力異常を解析する重力探査により 花崗岩体の地下構造が推定されている例は多く (Bott & Smithon, 1967; 鍋谷ほか, 1972等) チタン鉄鉱系・磁鉄鉱系花崗岩体兩者について重力異常が認められている。

寺島 (1983) は日本各地の岩石の密度の測定データを集計し検討を加えた (第6図)。 それによれば チタン



第6図 花崗岩類とその母岩の岩石密度 (寺島 1983原図)

鉄鉱系花崗岩類は 2.45~2.75g/cm³の密度をもち 平均値は 2.59g/cm³である。 この値は非-弱変成古生界の密度 2.55~3.00g/cm³ (平均2.70g/cm³) より 0.1g/cm³程度小さい。 この密度差は 花崗岩体の大きさ 深度にも依存するが 十分に重力異常として岩体の存在がとらえられる大きさである。 特に鉱床形成に関連した花崗岩は分化の進んだ優白質な岩石であるので 密度は小さく明瞭な負の重力異常が期待される。

一方 磁鉄鉱系花崗岩は 2.50~2.85g/cm³ (平均2.68g/cm³) とチタン鉄鉱系花崗岩より密度が大きい。 そのため 母岩との密度差が小さく 顕著な重力異常が期待できないが 中心部に優白質な岩相をもつ累帯花崗岩体の場合は負の重力異常が認められている (鍋谷ほか 1972)。

我が国では一般に 花崗岩は正の重力異常を示すと考えられがちであるが 対象となる花崗岩体の岩系と珪長質度によっては 正 負のいずれの場合も有りうることを特筆しておきたい。

イングランド南西部のコーニッシュ型スズ鉱床地帯では 花崗岩体を中心とする顕著な重力異常 (第7図) が知られている (Bott & Smithon, 1967)。 この地域最大のダートモア岩体の上では この地域の広域重力を+20 mgal とする場合に 40mgalを超える負の重力異常が認

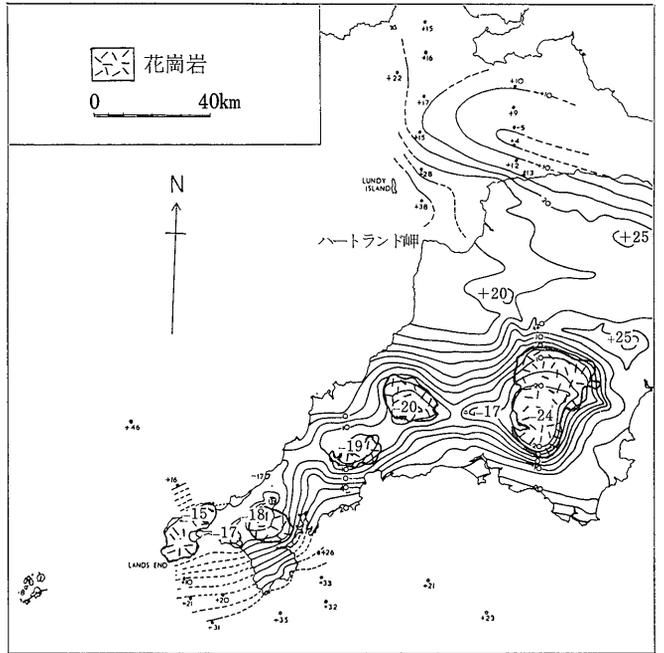
められる。またこの重力異常は西方の花崗岩体へ延び 地下における岩体の連続を示唆している。半島南西部カーンメネリス岩体周辺の重力異常はその中心が岩体北西部にあり負の異常がさらに北へと広がっている。すなわち花崗岩は地表に露出していないものの地下で北方へ延長していることが読みとれる。このことはカーンメネリス岩体北方に鉱脈が集中している(第2図)ことと調和的で重力探査により求められる潜在花崗岩体の推定が鉱床探査に有効であることを示している。

日本においても金属鉱業事業団の広域調査では地質調査と共に重力探査等物理探査が行われている。タングステン・スカルン鉱床を探索の中心とした錦川地域の広域調査(通商産業省・資源エネルギー庁 1981)では広島花崗岩が中-古生界よりその密度が  $0.15\text{--}0.20\text{g/cm}^3$  低いとの仮定のもとに3次元解析が行われ花崗岩上面深度が求められている(第8図)。玖珂 藤ヶ谷および喜和田の各鉱山はいずれも潜在花崗岩体の盛り上がった部分に位置している。また広域調査ボーリングのうち花崗岩露出域に近い3孔では花崗岩が捕促されている(第8図)が残念ながら花崗岩露出岩体を離れた全域にわたる潜在岩体の探査は行われておらず第8図の花崗岩上面深度は推定の域を出ていない。

このように重力探査により花崗岩が地表に露出している地域では地下におけるその延長 また露出していない地域では岩体の存在の有無についての推定がなされる。特にスズ-タングステン鉱床を伴うチタン鉄鉱系花崗岩は密度が低いことから重力探査による解明が有効である。

茨城県高取鉱山周辺地域ではスズ-タングステン鉱床の鉱化作用をもたらした花崗岩体は知られていないが花崗岩体が地下に存在し 鉱化作用をもたらしたと考えられている(池田ほか, 1983等)。高取鉱山の位置する八溝山地鶏足山塊には南部に稲田花崗岩体 東部には小規模な岩体として岩船岩体および谷津岩体の花崗岩類が分布している。しかし高取鉱床から稲田岩体まで約13 km 岩船岩体まで約3.5kmと離れている。

地質調査所(1985)によりまとめられた関東地方のブーゲ異常図にはこの地域のデータも含まれておりいくつかの重力異常の特徴が読みとられる(第9図)。鶏足山塊は130mgalの重力異常コンターによって取り囲まれていて山塊の外側では重力異常が急激に負の方向へ傾斜している。この異常は中生界から成る基盤のプロッ



第7図 イングランド南西部のブーゲ重力異常図 (Bott & Smithon, 1967原図)。重力異常コンター: 5 mgal

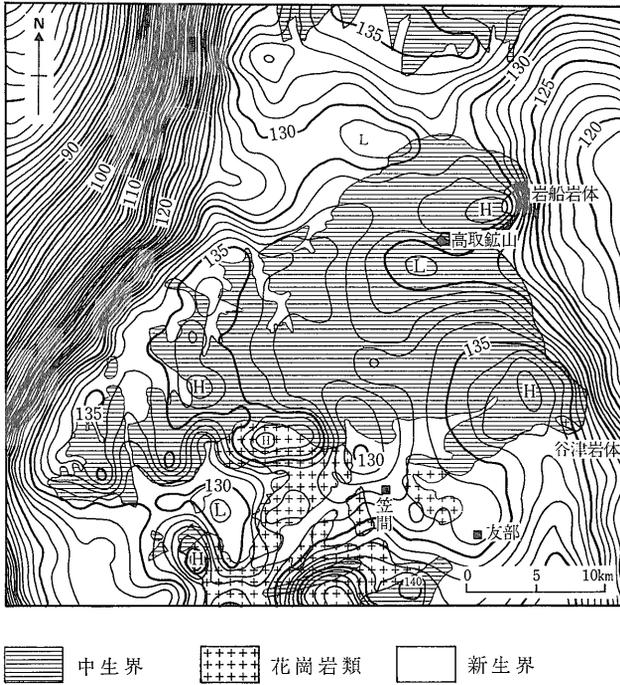
ク状隆起地域と新生代の堆積盆の形態を反映している。鶏足山塊内の重力異常のコンターは起伏が少なく またその値はほとんどが130-140mgalの範囲に入る。

稲田花崗岩体分布域の中に正の突出した重力異常が認められるがこれは重力異常図の作成においてブーゲ補正 地形補正の仮定密度を  $2.0\text{g/cm}^3$  としているためこの地域の岩石の密度と異なり 地形の影響が取り除かれていないことによる。しかし稲田花崗岩体分布域より北部の地域では地形の起伏も少なく(写真1) また高度も低いので重力異常図は地質構造を反映しているものと考えられる。

東部の岩船岩体と谷津岩体とは石英閃緑岩と花崗閃緑岩を主体としており周囲の岩石と同様な密度をもっていると考えられる。岩船岩体近くでは133mgalのコンターにより示される正の重力異常が認められる。さらに谷津岩体周辺も正の異常を示しまた花崗岩類の露出のない鶏足山塊西部にも同様な異常が認められる。これは3地域に中生界よりも密度の高い岩石 たとえば閃緑岩等が地下に広く存在している可能性もあるが笠間北部から高取鉱山南部に延びるトラフ状の負の重力異常が存在することによって現れた相対的な正の異常とも考えられる。

一方高取鉱山南西部には鶏足山塊内で最も低い 128 mgal のコンターで示される負の異常があり地下に密度





第9図

笠間地域のブーゲ重力異常図（地質調査所1985）。地質単元の分布域は通商産業省資源エネルギー庁（1986）より引用。重力異常コンター1 mgal。H：高重力域 L：低重力域

の低い岩石が存在していることを示している。

笠間から高取鉾山に延びる負の重力異常帯に スズタングステン鉱床を伴うような低密度の花崗岩が分布し高取鉾山南西部ではその花崗岩が地下浅部まで突出していると考えるとこの地域の重力異常が理解される。鉾山周辺における中生界の走向のS字状変化と鉾山内部の鉾脈裂かから求められた応力場（池田ほか 1983）がいずれも花崗岩体の上昇貫入によりもたらされたと考えると

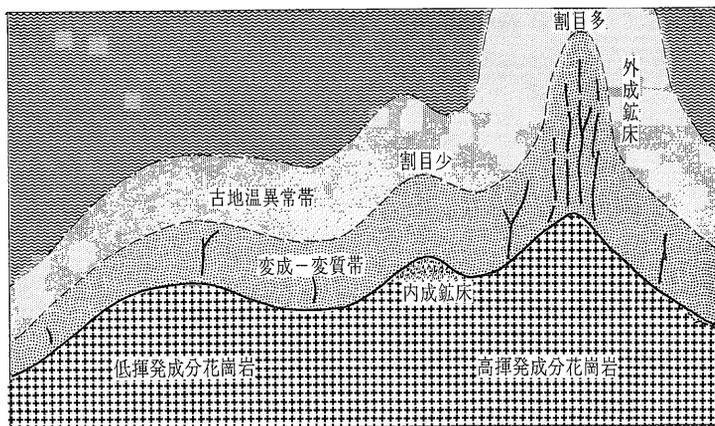
高取鉾山南西部に潜在花崗岩体を推定することにより説明ができ 重力異常図からの解釈と地質構造のデータは調和的である。

このように 高取鉾山周辺でも既存の重力異常図から潜在花崗岩体の位置について若干の検討が可能であるがさらに詳細な重力探査が計画されており その結果から花崗岩体の位置・形態が得られ 鉾床探査に貢献することが期待される。



写真1

高取山から南方をみた鶏足山塊の地形。山稜がほぼ横一線であることに注目



第10図  
チタン鉄鉱系花崗岩地帯に予想される熱履歴

#### 4. 古地熱異常と深部探査

火成岩体や熱水性鉱床は熱履歴を周囲の岩石に及ぼしているに違いない。花崗岩地帯の熱履歴は第10図のように推定される。すなわち基本的には花崗岩体の上昇侵入に伴ってその上面に熱伝導による温度の上昇がおきる。侵入と同時期かやや遅れて分離した熱水が上昇し、割目などに集中的な温度上昇がある。後者は一般的には熱水変質帯と呼ばれるが、接触変成帯にも岩体によっては揮発性成分を媒体として熱が移動したと思われる場合(例 日本のモリブデン鉱床地帯の接触部 石原1971)もあるであろう。

貫入岩体に近い壁岩では高温で鉱物の再配置が生じ、このような比較的高温部を明らかにする方法として次の2つが考えられる。

- (i)いわゆる接触変成帯の研究。主として珪酸塩鉱物安定領域から温度を推定する。
- (ii)角閃石/黒雲母 K-Ar 年代決定。角閃石 (530°C) と黒雲母 (280°C) のアルゴン固定温度の相違を利用する。

一方、今後の深部鉱床探査には接触変成帯より外側の弱い熱履歴を経験した岩石を手懸りとせざるを得ないから、100-300°C 程度の熱記録計が必要である。この分野は最近研究され始め未知の要素を多く含むが、下記のテーマが現在利用可能ではなかろうかと考えられる。

- (iii) 鉱物のフィッシュントラックのリセット
- (iv) 粘土鉱物などの結晶度上昇
- (v) 炭質物の熟成度 反射率変化 グラファイト化度
- (vi) コンドントの組織および色変化

- (vii) 古地磁気のリセット
- (viii) 流体包有物の重複熱履歴や組成変化

これらのうち被貫入岩が火成岩の場合と堆積岩の場合について一例をのべる。

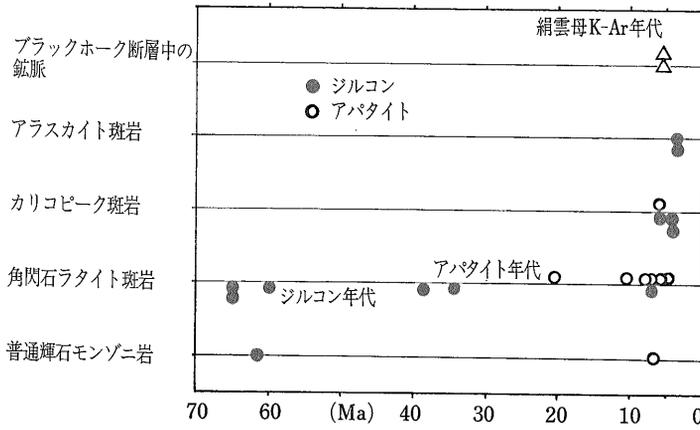
#### フィッシュントラック法

被貫入岩が火成岩である場合は、それが生成時に一度高温状態を経験しているから、固結後低温の熱水変質などをうけていない限り、温度の再上昇を表わす鉱物が少ない。このような条件下でも手懸りを与えてくれるものにアクセサリ-鉱物のジルコンやアパタイトの放射性飛跡がある。

K-Ar 法と同様に、フィッシュントラック年代決定に用いられる放射性飛跡も、造岩鉱物の種類によって飛跡を記録する温度、したがって消滅する温度が異なる。たとえばアパタイトは 90-150°C、 $10^5$  年程度保持されると飛跡が消滅する。一方ジルコンは 175-225°C 程度と考えられている。したがって両者の違いを利用して熱履歴を探ることができる。

コロラド州のサンホン山地西部のリコ鉱床地帯では石灰岩中で交代型、碎屑岩では鉱脈型の金・銀・銅・亜鉛鉱床が“ララマイド貫入岩”に伴われて産出する。貫入活動は年代決定により明らかに2時期に分けられる。早期はストック〜シル状のモンゾニ岩とラタイト班岩で、7組のジルコンとアパタイトの年代測定によるとアパタイトは 5-10Ma に集中するのに対し、ジルコン年代は4個が 60-65Ma、1個はアパタイトと同様な、また2個は両者の中間の値を示した(第11図)。

後期の火成活動はほぼ 5 Ma であり、鉱脈中の絹雲母も同時代である。そこで Naeser et al. (1980) は 60-65Ma の貫入岩にみられるアパタイト年代は 5 Ma の貫入活動によりリセットされたもので、一部の若返りジル



第11図

サンホワン リコ地域における火成岩類の鉱物別の年代差。原値はNaeser et al. (1980)。アパタイトがジルコンより著しく若く出る点に注目

コン年代はその部分が 175°C 以上に達したためであろうと考えている。更にアラスカイト斑岩が著しい変質や硫化物鉱染をうけていること カリコピーク斑岩(閃雲ラタイト質)が明ばん石変質を伴うことから これら斑岩付近でリセット年代を示す部分の深部にはストック状花崗岩体が潜在し ポーフィリー型鉱床が伴われるものと予想している。

グラファイト化度

被貫入岩が堆積岩である場合には 炭質物 コノドント 粘土鉱物など 多くの使いうる材料がある。堆積岩は低温で生成しているから これらの鉱物や化石は熱には敏感に反応するものと思われる。炭質物熟成度 コノドント 粘土鉱物の結晶度上昇などは 堆積岩類における低温履歴から石油熟成を知るために有効であろう。 績成・褶曲作用を経験し さらに火成活動を受け

た島弧の造山帯に適用しうるものとして ここでは田切美智雄によって体系づけられている炭質物のグラファイト化度をとり上げてみたい。

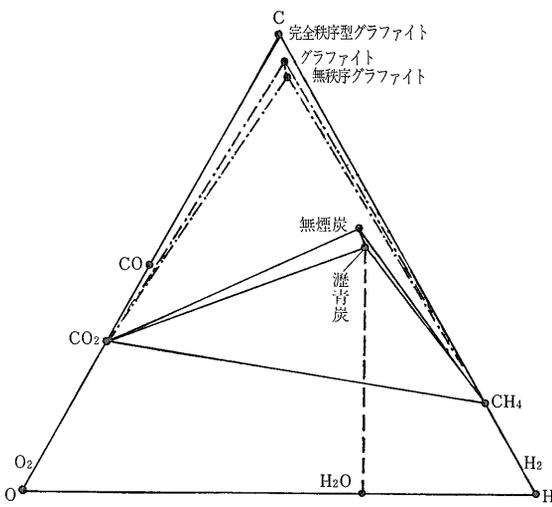
堆積岩は種々の起源を持つ炭質物を含有する。それは物理的な圧密による脱水と埋没され温度圧力が上昇することにより起こる物理化学的变化により石炭化する。石炭化の究極は瀝青炭・無煙炭である。さらに温度が増加することで O-H を失い相対的な炭素の量比が高まり また炭素の配列が秩序化されグラファイト構造を持つようになる(グラファイト化)。さらに再結晶化により粗粒化が進んで最終的には六方晶系の層状構造を持つ秩序型グラファイトに変化する。C-O-H の関係は第12図のように示される。

非晶質炭素質物がグラファイト構造を持つと X線回折が有効に利用できる。天然産グラファイトは  $d_{002} = 3.37 \text{ \AA}$  付近から理論値  $d_{002} = 3.3539 \text{ \AA}$  へ向けて面間隔が小さくなり 同時に 結晶子積層の厚み ( $L_c$ ) は大きくなる。  $L_c$  は 002 ピークの位置と幅から求める (くわしくは田切 1981 1985を参照)。炭質物の 結晶学的性質は  $d_{002} = 3.37 \text{ \AA}$   $L_c(002) = 100 \text{ \AA}$  付近で急激に変化し ここがグラファイトと非グラファイト炭質物の境界を示すが 両指数は巨視的には負の相関性を持ち 各地の広域および接触変成帯において鉱物相ともよい相関性を示す(第13図)。そこで Tagiri (1981) は両指数を結合させてグラファイト化度 (GD, graphitizing degree) を提唱した。

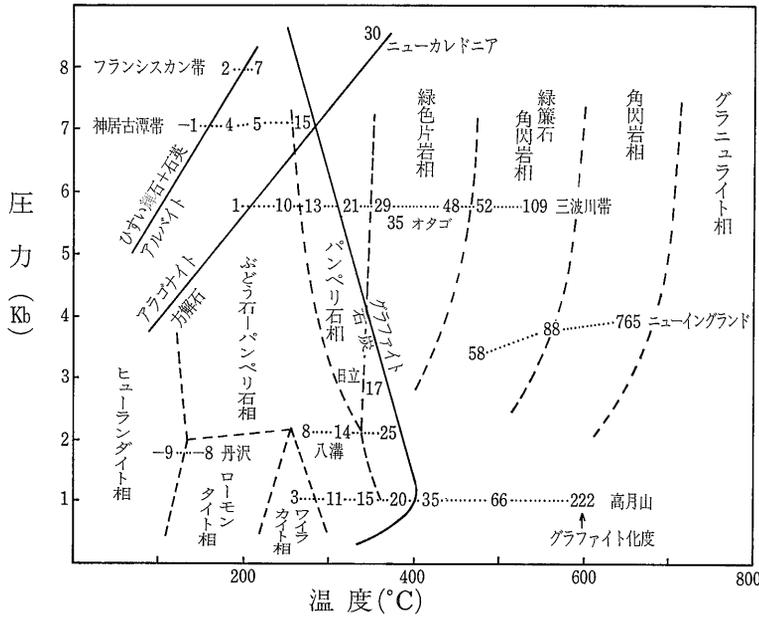
$$(GD) = [d_{002} - 3.70 / \log (L_c(002) / 1000)] \times 100$$

この式はそれぞれ実測値で  $d_{002}$  最大値を  $3.70 \text{ \AA}$   $L_c(002)$  最大値を  $1000 \text{ \AA}$  (第14図) を原点として結んだ直線の勾配であり この数値でグラファイトと非グラファイト系炭質物との境界は約32である。

田切 (1985) は世界各地の変成帯の GD 値を 変成鉱物相と共に温度-圧力図に示した (第13図)。そして  $GD = 30 \pm 5$  が変成タイプの相違や圧力と無関係に ほぼ 400



第12図 天然産炭質物のC-O-H関係図 (田切 1985原図)



第13図 変成岩の温度-圧力図と各地変成帯にみられるグラファイト化度の変化(田切 1985を簡略化)

℃線上にのり この指数が温度函数として示され過去の熱履歴に大きく依存することを強調している。

花崗岩との接触変成帯では宇和島東方の高月山岩体の研究がある(第14図)。岩体東部の目黒露頭ではGD指数の急変部は花崗岩接触部から約1 km 地点である。高月山岩体の東側接触部は東方へ約70°の傾斜を持ち(寺岡ほか 1986) したがって 接触部から約940m が

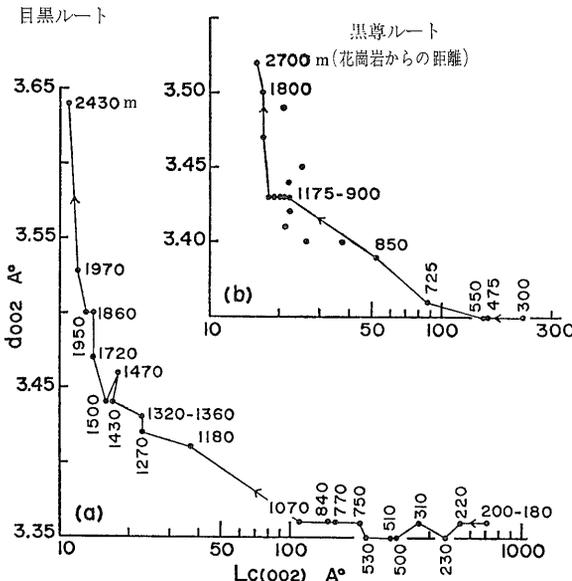
ラファイト帯に当る。一方岩体南方の黒尊ルートではグラファイト帯は約700m 発達するにすぎない。この場合の実距離は不明である。

GD値は「笠間広域」の鶏足山塊の中-古生層でも求められた(通商産業省 資源エネルギー庁 1986)。この初年度の報告によると GD値は-10~103の変化を示しGD値32以上の値は139個の測定中わずかに4個(3%)である。この4個は露出花崗岩岩体の近傍のものである。したがって多くのものは低い値を示し 高月山岩体目黒ルートと比較する時 これらは花崗岩体から離れている印象をうける。

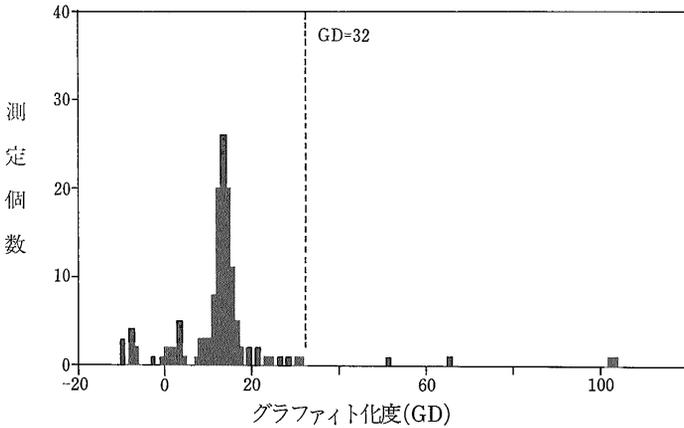
今一つの特徴はGD=13を中心として著しい集中がみられることであり(第15図) GD=10~16の値は全測定値の67%を占める。この事実はGD値16以下の岩石は花崗岩の貫入以前の統成-変形作用時の熱履歴を保持していることを示している。潜在花崗岩体の影響はGD=17~32の低い値として表われているものと思われる。このような低GD値における詳細な熱履歴の解析は未開拓の分野であり 今後の研究が期待される。一方グラファイト化は高温流体(鉱液)の通路においては著しく進行するかも知れない。このような化石熱水系を探索ことにグラファイト化度が適用できれば潜頭鉱床探査が一步前進するので今後の成果に注目したい。

鉱化花崗岩体の推定

重力探査やグラファイト化度によって 潜在花崗岩体 とくにその突起部を推定することは可能であろう。



第14図 宇和島東方 高月山花崗岩体接触部四十層群におけるグラファイト化度の変化(Tagiri, 1981原図)



第15図  
笠間地域と鶏足山塊堆積岩類のグラフ  
ァイト化度のヒストグラム (原値は通  
商産業省資源エネルギー庁 1986)

突起部が鉱床を伴うか否かの判定が次のステップであり  
かつ探査上の主たるテーマである。 全ての突起部が江  
西省南部のように鉱床を伴うとは限らず エルツゲビル  
グでは東部では2つに1つ しかし西部では不毛である  
ことの方が多い。 グライゼン型 スズ-タングステン鉱  
床は既述のようにチタン鉄鉱系花崗岩の分化相で 微量  
成分としての F, Li, Be, Sn, W などが著しく多いこ  
とがわかっている。 これら成分は近傍の鉱床にも多く  
含まれるに違いない。

高取鉱山の鉱脈には鉄マンガン重石のほか 錫石・螢  
石・Li 白雲母 そしてやや多量の硫化物が含まれる。  
したがって潜在岩体は上記化学的特徴を持つ優白色花崗  
岩のはずであり かつ母岩の堆積岩にもその化学的性質

が反映されているものと考えられる。 初年度の成果に  
よると 予想は見事的中し 鉱脈からの距離を問わず  
鉱山内の堆積岩は鉱脈に産出する成分で著しい異常を示  
した (第2表)。

上記鉱化変質岩が花崗岩に対してどのような位置にある  
かはまだ充分にはわかっていない。 世界各地の鉱床で  
は一般に花崗岩突起部上の堆積岩は黒雲母ホルンフェル  
スと記載されている例が多いが 詳細は記載が少なくよ  
く吟味されていない形跡がうかがえる。 錦川地域の接  
触変成作用は花崗岩側から点紋ホルンフェルス化 無点紋  
ホルンフェルス化 弱ホルンフェルス化に 3分された  
(通商産業省資源エネルギー庁 1981)。 泥質砂質岩におい  
てはいずれの分帯においても 黒雲母-白雲母組合せが一  
般的であり 前2者では一部に堇青石・紅柱石があらわ  
れている。

高取鉱床の場合は砂質岩が多く 堇青石などは知られ  
ていない。 鏡下ではほぼ等量の淡褐色黒雲母と白雲母  
そして螢石が普遍的に産出し 黒雲母ホルンフェルスよ  
りもグライゼンに近い印象をうける。

「グライゼン」は花崗岩を母岩とするエルツゲビルグ  
ツンワルド鉱床の変質岩を典型とするが これはツンワ  
ルダイト-トパズ-石英岩である。 すなわち LiとFの  
富化を伴う雲母変質とみなしうる。 したがって高取鉱  
床母岩の変質はグライゼン化と定義する方がよいもの  
と思われる。

グライゼン化変質は高取鉱山の坑道全域に km 単位  
の規模で認められており 一般の脈際変質とは異なってい  
る。 この変質帯は(i)花崗岩よりの最内帯 黒雲母ホル  
ンフェルスより内側に存在する (ii)最内帯の早期黒雲母  
ホルンフェルス中の煙突状の後期変質帯である 2つの  
可能性を秘めている。 いずれの解釈を採用するかによ  
って 潜在岩体と鉱床の探査方針に大きく影響する。

グライゼン化はいずれにしても鉱床の場を直接に指示

第2表 高取鉱床母岩 (主に砂岩 一部頁岩) にみられる化  
学的異常 (通産省資源エネルギー庁 1986原表)

分析成分	鉱化帯 試料群 平均値 (n=31) A	非鉱化帯 試料群 平均値 (n=11) B	A/B
W (ppm)	14.8	1.5	9.9
Sn (ppm)	10.5	1.1	9.5
F (ppm)	16,764.5	455.5	36.8
Li (ppm)	804.9	24.4	33.0
Rb (ppm)	1,494.2	132.9	11.2
Be (ppm)	13.7	1.5	9.1
Bi (ppm)	1.2	0.1	12.0
Tl (ppm)	4.8	0.7	6.9
Pb (ppm)	16.4	4.8	3.4
Zn (ppm)	140.9	34.5	4.1
Cd (ppm)	1.1	0.1	11.0
Cu (ppm)	74.1	14.7	5.0
Ba (ppm)	707.1	475.0	1.5
MnO (%)	0.244	0.048	5.1
K <sub>2</sub> O (%)	4.971	3.279	1.5
S (%)	0.283	0.089	3.2

するし 鉱化花崗岩ともそれほど遠くはないであろう。鉱化域がより深く潜頭性である場合に その外殻にどんな指示成分が特徴的に現われるかが探査手法の確立上最も重要な命題である。一般には鉱床規模のゾーニングにみられる  $As \cdot Cu \rightarrow Pb-Zn \rightarrow Sb \cdot Hg \cdot Au$  などの上方へ向けての分帯が現われるものと期待される。高取地域では破碎帯試料が深部情報をより良く伝達するとの発想のもとに分析された結果 Hg, Sb, Au, As, U, Se などの異常が認められ(通商産業省 資源エネルギー庁 1986) 今後に展望を開いた。

### 5. あとがき

現在金属鉱業事業団で実施されている国策に基づく「広域調査」は最初地質調査所の特別研究として実施され 昭和38年の金属鉱業事業団設立と共に同事業団に引継がれた。当初は両組織の地質家も野外調査などの実務に参加したが その後全面的に民間に委託された。

近年の国内金属鉱物資源の枯渇 円高による閉山の続く環境のなかで レアメタルを初めとして鉱物資源の用途はむしろ拡大している。新しい国内資源を発見し自給率を回復することは国の安全保障上第一級の課題である。鉱床探査はますます深部へ向い困難さを増し その探査システムを確立するためには長期の基礎研究と高度な技術開発が必要である。

笠間広域は地質調査所における花崗岩や大学におけるグラファイトの基礎研究をもとに 金属鉱業事業団の野外調査能力を再活性化し 深部鉱床を探査すると共に探査技術の先導的システムの開発をはかろうとする新しい試みであり 関係各位の暖かいご支援をお願いしたい。

この小文は昨年12月の調査開始に当る際の私達の予備知識 心づもりをもとに 初年度成果に対する若干の感想を加えて書きおろした。実際の調査は金属鉱業事業団広域調査課をはじめとする多数の同事業団職員 地質調査所鉱床部 地質部 物理探査部 海外協力室および筑波大学のメンバーで実施された。金属鉱業事業団石川理事は現地を訪れて調査員を激励された。小文をまとめるに当たっては グラファイトについて茨城大学田切美智雄博士の助言を得た。以上の各位に深謝する。

### 文 献

Bott M. H. P. and Smithon S. B. (1967) Gravity investigations of subsurface shape and mass distributions of granite batholiths. *Geol. Soc. Am. Bull.* v. 78, p. 859-879.  
 地質調査所 (1985) 関東地域重力図(ブーグ異常図). 特殊地質図24号.  
 Hawkes J. R. (1984) The Variscan (Hercynian) granites 1986年10月号

of South-west England and spacially associated mineralization. *Geology of Granites and their Metallogenetic Relations* (Xu & Tu edit.). 中国科学社 北京, p. 571-594.  
 池田則生・肥田博行・野口一明・藤原操 (1983) 茨城県高取鉱山の地質鉱床—とくに断裂系について. *鉱山地質* v. 33, p. 94-114.  
 石原舜三 (1971) 日本の主要モリブデン鉱床および関連する花崗岩類. *地質調査報告* 239号, 178p.  
 ——— (1975) エルツゲビルゲの旅. *地質ニュース* 249号, p. 18-35.  
 ——— (1980) プリモリーエの錫鉱床. *地質ニュース* 308号 p. 36-45.  
 Ishihara, S. (1981) The granitoid series and mineralization. 75th Anniv. vol. *Econ Geol*, p. 458-484.  
 石原舜三 (1983) 中国の鉱物資源 ④タングステン鉱床. *地質ニュース* 346号, p. 39-51およびグラビア.  
 金属鉱業事業団広域調査課 (1986) 昭和60年度レアメタル賦存状況調査—特に笠間地域予察調査について—ばなんざ 126号 p. 2-8.  
 鍋谷祐夫・加納博・乗富一雄・高木章雄・鈴木将之・藤本幸雄 (1972) 北上山地に於ける花崗岩体の重力構造(その1 遠野地域). *物理探鉱* 25巻, p. 153-167.  
 Naeser C. W., Cunningham C. G., Marvin R. F. and Obradovich J. D. (1980) Pliocene intrusive rocks and mineralization near Ricco, Colorado. *Econ. Geol.* v. 75, p. 122-133.  
 佐藤興平 (1982) 中国のタングステン鉱床. *地質ニュース* 333号, p. 31-44.  
 清水大吉郎 (1977) アグリコラと「デ・レ・メタリカ」. *地球科学* 31巻 p. 228-234.  
 Tagiri, M. (1981) A measurement of the graphitizing-degree by the x-ray powder diffractometer. *岩鉱* 76巻, p. 345-352.  
 田切美智雄 (1985) グラファイトの岩石化学—炭質物の再結晶. *月刊地球* 8巻, p. 39-45.  
 寺岡易司・池田幸雄・鹿島愛彦 (1986) 宇和島地域の地質. *地域地質研究報告* (5万分の1地質図幅). *地質調査所*, 91 p.  
 寺島進世意 (1983) 磁鉄鉱系・チタン鉄鉱系花崗岩類の帯磁率と密度. *物理探鉱* 36巻, p. 345-353.  
 Tischendorf G., Hösel G., Lange H. and Bolduan, H. (1971) The geochemical and structural control of the tin mineralization in the Erzgebirge. *鉱山地質特別号* 6, p. 15-19.  
 通商産業省資源エネルギー庁 (1981) 昭和55年度広域調査報告書 「錦川地域」 150p.  
 通商産業省資源エネルギー庁 (1986) 希少金属鉱物資源の賦存状況調査報告書「笠間地域」. 53 p.  
 Yang M. and Lu D. (1982) structural characteristics and forms of arrangement and composition of the vein-type tungsten ore in Xihuashan-Piaotang district. *Tungsten Geology, Jiangxi, China* (Hepworth & Yu edit.), *地質科学社* 北京, p. 521-532.