

# 新しい始生代花崗岩類の分類法 -西オーストラリア州, イルガン地塊を訪ねて

石原 舜 三<sup>1)</sup>

## 1. まえがき

先カンブリア地塊には苦鉄質火山岩類(“グリーンストーン”)と共に, 一般にTTG(トナル岩-トロニウム岩-花崗閃緑岩)と通称される花崗岩類が広く分布する。これらは, 従来, 貫入するグリーンストーン帯の火山岩類との野外関係や片麻状構造の有無などに基づき, たとえば褶曲時貫入片麻状花崗岩類, 褶曲後期貫入花崗岩類, 褶曲後貫入花崗岩類などと分類されることが一般的であった(例, 石原ほか, 1998)。その後, 年代測定が普及し, 見かけの変形構造と貫入活動との間には単純な時代的關係が得られないことが判明した。すなわち同様な性質を持つ花崗岩類が異なる年代を持ち, 様々な変形を受けている。また近年の機器分析装置の普及により, 花崗岩類の化学分析値が容易に得られるため, 新しい花崗岩類の分類が化学的性質に基づいて提案されている。ここではそのような一例として西オーストラリア州のイルガン地塊(Yilgarn massif)の例について示そうと思う。

この研究は, 国立研究所であるジオサイエンス オーストラリアの花崗岩研究者が, この地域に豊富な金

属鉱物資源探査に携わる鉱山会社の委託研究として実施した成果の一つである。鉱物資源としてはオロージェニック ゴールドと呼ばれる金鉱床が主目的である。これは花崗岩類の貫入を受けるグラニュライト相から緑色片岩相に至る変成火山岩類~堆積岩類の破碎帯に金粒が鉱染するものであり(服部, 2003), ブラジルでは縞状鉄鉱層との関連性が特に密接である(石原, 2004)。イルガン地塊のこの鉱床は世界の金産額の約10%をまかない, 資源的に非常に重要である。最大のカルグーリのゴールデン鉱山の総産金量は1,400トンであり(Department of Mines, W. A., 1990), 我が国の歴代の総産金量よりも多い。

筆者は, 一昨年(2005)の秋, 委託研究の担当者(Dr. David Champion)の案内で, 友人のBruce W. Chappellと共に, イルガン地塊の花崗岩類を見学する機会を得て, 最新の研究の一端に触れることが出来た。ここでは, 彼らのこの地の花崗岩類に対する見方, 成因的解釈, 更にはその旅の印象も記してみたい。なお金探鉱地の朝は早く, パースと探査中心地カルグーリ(写真1, 2)との間のフライトは, 往復ともに朝6時の空港出発であった。



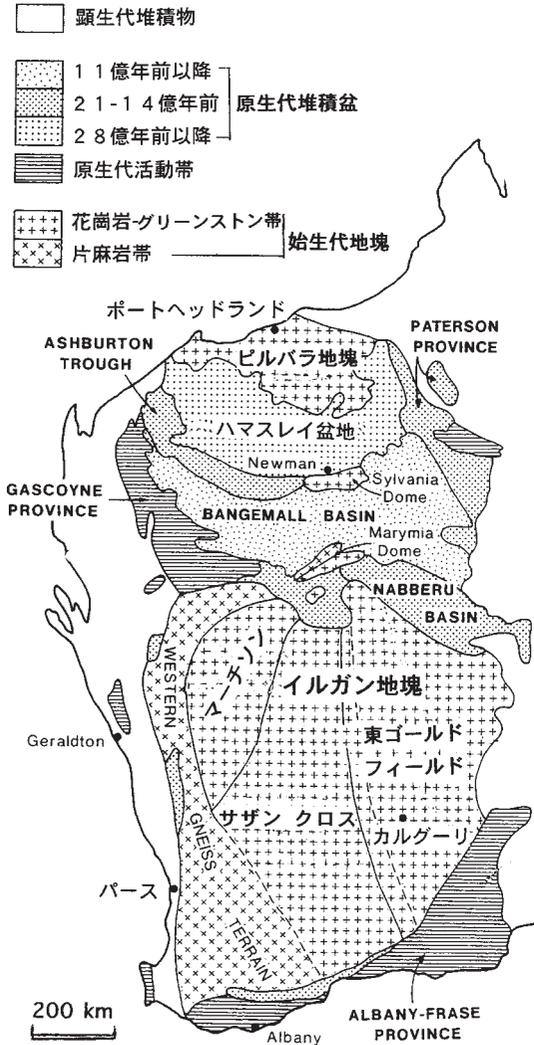
写真1 カルグーリの中心, ホテル街。



写真2 カルグーリの中心, 公園とショッピング モール。

1) 産総研 特別顧問

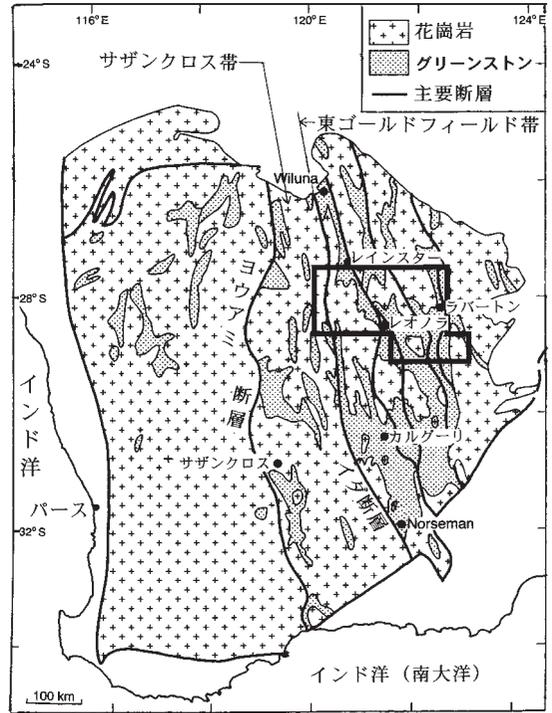
キーワード: 花崗岩, 先カンブリア時代, イルガン, TTG, HSFE



第1図 オーストラリア西端部の地質構造概略図 (Solomon and Groves, 1994).

## 2. 構成岩類の概要と帯磁率

オーストラリアの地質は大局的に西側で古く、東方へ新しい。西端北部に最も古いビルバラ地塊が存在し、これについては本誌ですでに解説した(石原, 2003)。先カンブリア時代の鉄鉱層を含むハースレイ盆地などを経て、その南方にビルバラ地塊よりやや若いイルガン地塊が分布する(第1図)。イルガン地塊は30-26億年前の年代を持つ花崗岩-グリーンストーン複合体であり、その西部に30億年前より古い片麻岩類が分布する。現在のイルガン地塊は海拔200-400

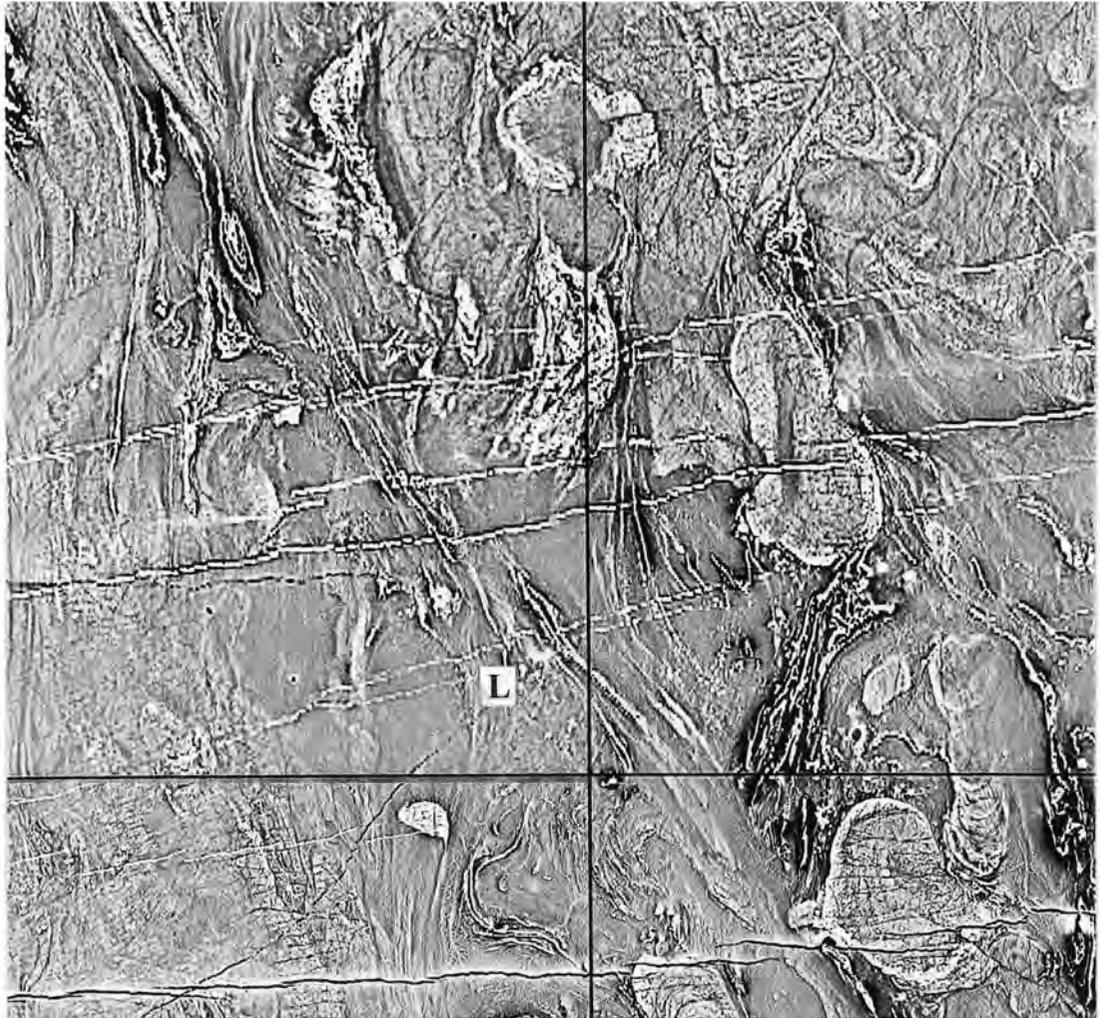


第2図 東ゴールドフィールド スーパーテレンの概要と第6図の位置 (Champion and Sheraton, 1997).

mの平坦な高原であり(写真3, 4), 先カンブリア時代の変成岩・花崗岩類を覆って局所的な窪地に第三紀と第四紀層が薄く発達している。

イルガン地塊は、主に低い変成度の火山-堆積岩類と花崗岩類からなる。北西部と南西部の一部では変成度が高く、グラニュライト相に達している。イルガン地塊は西から東へ、マーチソン、サザンクロス、東ゴールドフィールドの3地区に分けられる。マーチソン地区の西方には花崗岩類を主体とする西部片麻岩テレンが存在する(第1図)。

イルガン地塊は個々に発達した先カンブリア時代の珪長質地殻が合体したスーパー テレンと考えられる。東ゴールドフィールド テレンの西端はイダ(Ida)断層、サザンクロスの西縁はヨウアミ(Youanmi)断層で画される(第2図)。イダ断層は東方へ緩く傾斜し、幅広いダクタイル褶曲帯を伴う。一方、ヨウアミ断層は急角度で西側のスーパー テレンに接し、付加時のテレン境界と解釈されている(Myers, 1997)。ラバートン東方にはダクタイル変形を伴うラバートン破砕帯がある。



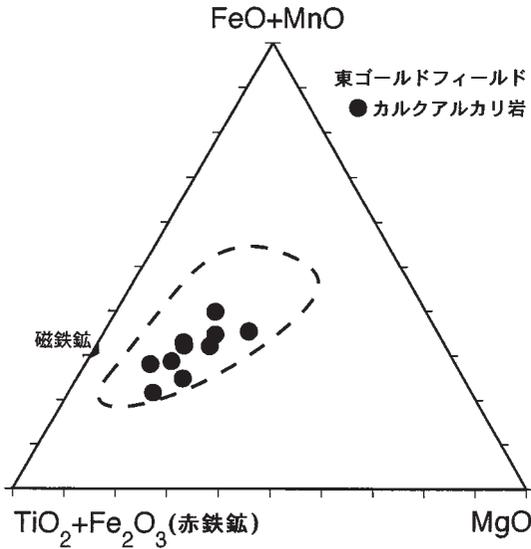
第3図 東ゴールドフィールドにおける空中磁気図の一例 (Whitaker, 2001). スケール: 1/100万 (横幅152km). 上限 (南緯28°) が第7図の上限と一致する. 曲線は褶曲構造, 楕円形は花崗岩体, 東西の直線は磁鉄鉱系岩脈.



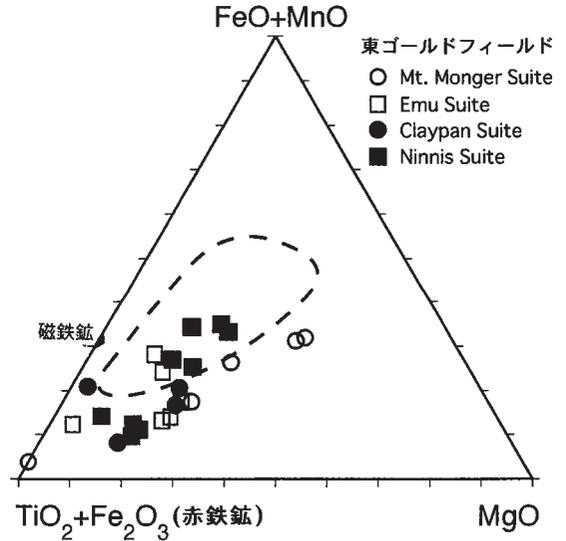
写真3 イルガン地塊の典型的な露頭. 位置の確認はGPSに頼り, 前回の分析地点に戻ることが出来る.



写真4 稀に見る土木工事用の採石場. 右側に<sup>れつ</sup>裂罅に沿った変質帯が走る.



第4図 東ゴールドフィールド花崗岩類の10岩体平均値の酸化／還元図。破線領域は日本の磁鉄鉱系領域。原分析値はSmithies and Witt (1997)による。



第5図 東ゴールドフィールド花崗岩類の閃長岩類の酸化／還元図。破線は第4図と同じ。原分析値はSmithies and Champion (1999)による。

花崗岩類は南北ないし北北西-南南東方向に伸長する楕円形の形態を示す (Geoscience Australia, 2004)。空中磁気図によると、花崗岩類の多くは磁性を持つためにその輪郭が見事に浮き上がって見える (第3図)。この図で最も磁性が強い南北系の縞状部分は熱水変質作用によって磁鉄鉱が生じたグリーンストーン帯の火山岩類であり、このような所にオローゼニック ゴールドは産出する。一方、グリーンストーン帯の堆積岩類は最も低い帯磁率を示す。

野外調査時の携帯用帯磁率計の測定によると、一部の片麻状トナル岩が低い帯磁率を示し ( $0.1 \sim 1.9 \times 10^{-3}$  SI)、一般の高カルシウム タイプは  $3 \sim 17 \times 10^{-3}$  SI の高い値を示した。一部ではチタン鉄鉱系 ( $< 3.0 \times 10^{-3}$  SI) に属する低い値を持つものがあり、その様な岩石は一般に片麻状構造を持っている。低カルシウム タイプも主に磁鉄鉱系の値を示す。苦鉄質タイプについては測定例が少ないが、磁鉄鉱系を示すようであった。すなわち、南アのバーバトン地域と異なり、明らかに酸化型花崗岩類が増加している (Ishihara *et al.*, 2006)。

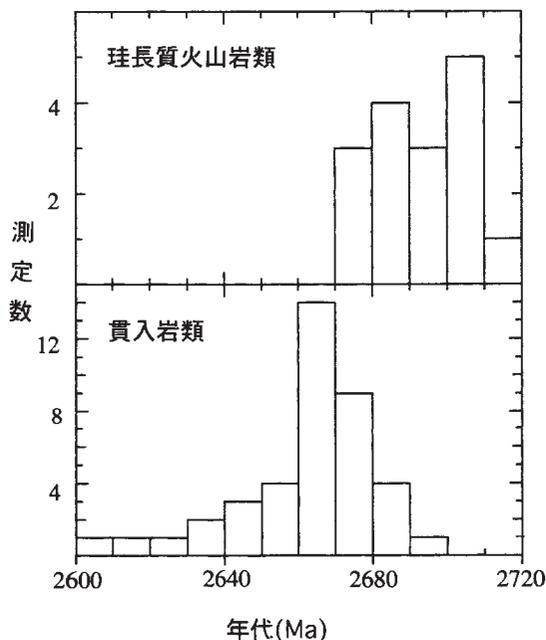
花崗岩類の酸化／還元状態については化学分析値による報告がある。Smithies and Witt (1997) は東ゴールドフィールド テレンのカルクアルカリ岩系 (高・

低Ca系)の平均値を10岩体についてまとめたが、これらは  $FeO + MnO - Fe_2O_3 + TiO_2 - MgO$  図上ですべて日本の磁鉄鉱系花崗岩類の範囲に落ちる (第4図)。閃長岩類からなるアルカリ岩もこの図の磁鉄鉱から赤鉄鉱に向けての領域にプロットされ (第5図)、これら岩石の酸化度が高いことが明らかである。

グリーンランドの世界最古の花崗岩類の酸化／還元状態から明らかのように、初期の地殻、地球表面も恐らく還元的であり、そして31億年前には初めて酸化的な花崗岩が南アのバーバトン地塊で現れる (Ishihara, 2004)。東ゴールドフィールド テレンの花崗岩類はそれより若く26-27億年の年代を持つ。これらが基本的には磁鉄鉱系であることは、この4-5億年の間に地殻上層部を酸化せしめる地球規模の要因が発生したことを意味している。

### 3. 花崗岩類の分類

イルガン地塊は数十億年に亘って浸食され続けた平坦な高原であり、花崗岩露頭はブッシュの中で露岩を探す (写真3, 4)。花崗岩類は同質の火山岩類を伴う。珪長質火山岩類は27.2~26.7億年の年代を持つ (第6図)、同様な組成の深成岩類である花



第6図 火山岩類と花崗岩類タイプ別のジルコン年代 (Champion and Sheraton, 1997).

崗岩類は27.2-26.3億年の幅を持ち、少し若い。特に26.8-26.5億年に集中する。

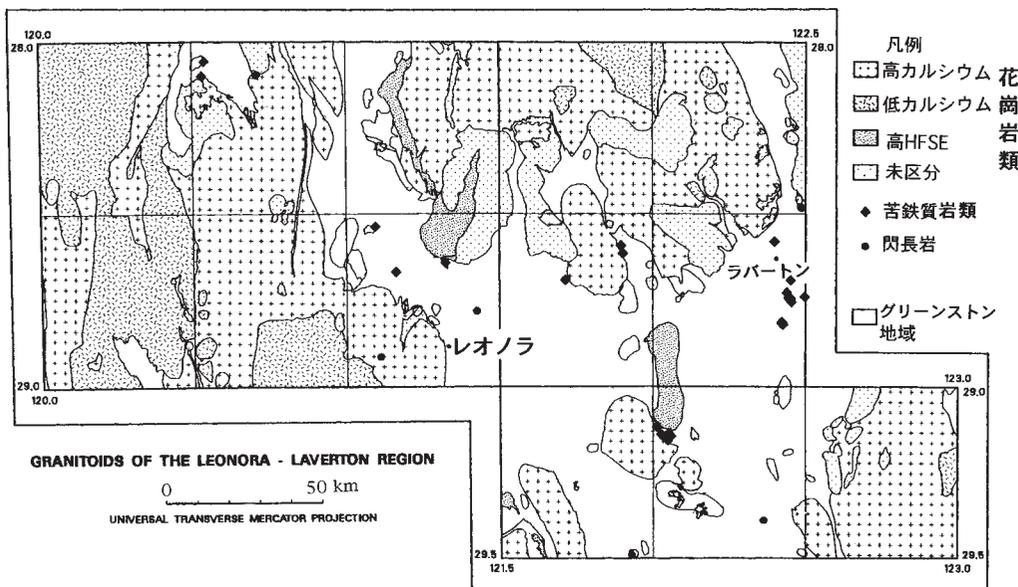
Champion and Sheraton (1997) は、野外の産状と地球化学的な性質に基づき、当地塊の花崗岩類をレ

オノラ-ラバートン地域において、次の5タイプに分類した。すなわち主要な(1)高カルシウム、(2)低カルシウム、および少しの(3)苦鉄質、(4)高HFSE (High Field Strength Elements)、(5)閃長岩(第7図)。

花崗岩類は量的には高カルシウムタイプが最も多く、全露出面積の約60%、低カルシウムタイプが約20%である。以上が先カンブリア地塊で著名な、いわゆるトナル岩-トロニウム岩-花崗閃緑岩(TTG, 石原ほか, 1998)に相当する。当地域では他の先カンブリア地塊に比べて珪長質であり、TTGではなくTGG(トナル岩-花崗閃緑岩-花崗岩)とも俗称されている。残りの3者は合わせても露出面積全体の20%を超えず、少量である。

高カルシウムタイプ(写真5-9)はグリーンストーン帯の中のみならず、その外側にも分布する。しばしば変形運動による片岩構造を示すが、塊状のものも多い。また長石斑晶を含む斑状花崗岩も一般的である。苦鉄質エンクレープをしばしば含有する(写真8, 9)。ゾーニングを示す斜長石に富み、苦鉄鉱物として主に黒雲母、少量の角閃石、微量の褐簾石、チタン石などを含む。

低カルシウムタイプ(写真10)も同様にグリーンストーン帯の内外に分布し、一般に弱い片麻岩構造(写真10)、一部で強い片麻状構造を示す。グリーンストーン帯外では片麻岩類にポット状に貫入し、「後構造期



第7図 レオノラ-ラバートン地域の地質図 (Champion and Sheraton, 1997).



写真5 高カルシウム タイプの片麻状トナル岩. 片麻構造の方向はN20° W.



写真8 苦鉄質エンクレーブを含む高カルシウム トナル岩 (1). このように母岩のグリーンストーンが混在するところは帯磁率が低い.



写真6 片麻状トナル岩のクローズ アップ(コイン直径は2cm).



写真9 苦鉄質エンクレーブを含む高カルシウム トナル岩 (2).



写真7 斜長石が斑晶状のトナル岩の風化面.

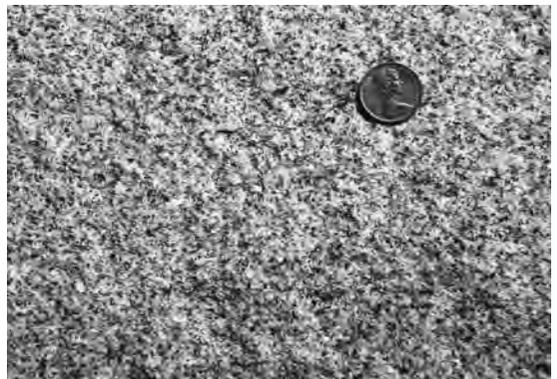


写真10 低カルシウム タイプのモンゾ花崗岩(マンガーリ).

花崗岩体”の産状を示す。カリ長石に富み、ピンク色を呈することがある。斜長石は一般にゾーニングを示さない。苦鉄鉱物は主に黒雲母、角閃石は非常に稀、褐簾石とチタン石が3%に達することがあり、また

微量のほたる石が含まれる。

高HFSEタイプ以下の3者は主にグリーンストーン帯内部に分布する小岩体である。高HFSEタイプは様々な程度の片麻状構造を示し、一般に火山岩類を伴って

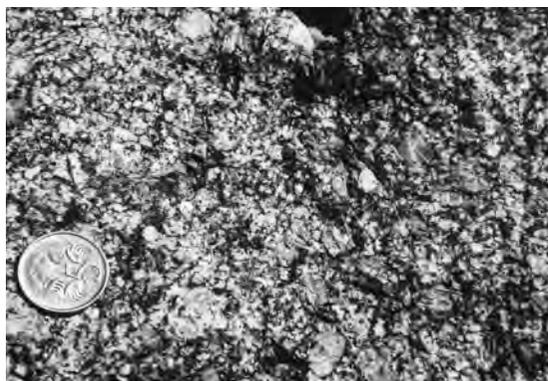


写真11 苦鉄質タイプ。斑晶状はカリ長石(コイン直径は2cm)。

分布する。当地域ではクーキニーからウィルナにかけての南北帯に限られて分布する。非常に珪長質であるが、苦鉄鉱物には角閃石と黒雲母が見られ、珪長質であるにも拘わらず角閃石を有することはこのタイプの特徴である。

苦鉄質タイプも多様な変形構造を示す。金鉱床の母岩となることが多い。筆者には色指数が高い花崗岩に見えた(写真11)。一般に斜長石>カリ長石、苦鉄鉱物は輝石、角閃石、黒雲母、チタン石が多く含

まれる。LILEに富むものでは黒雲母が卓越する。

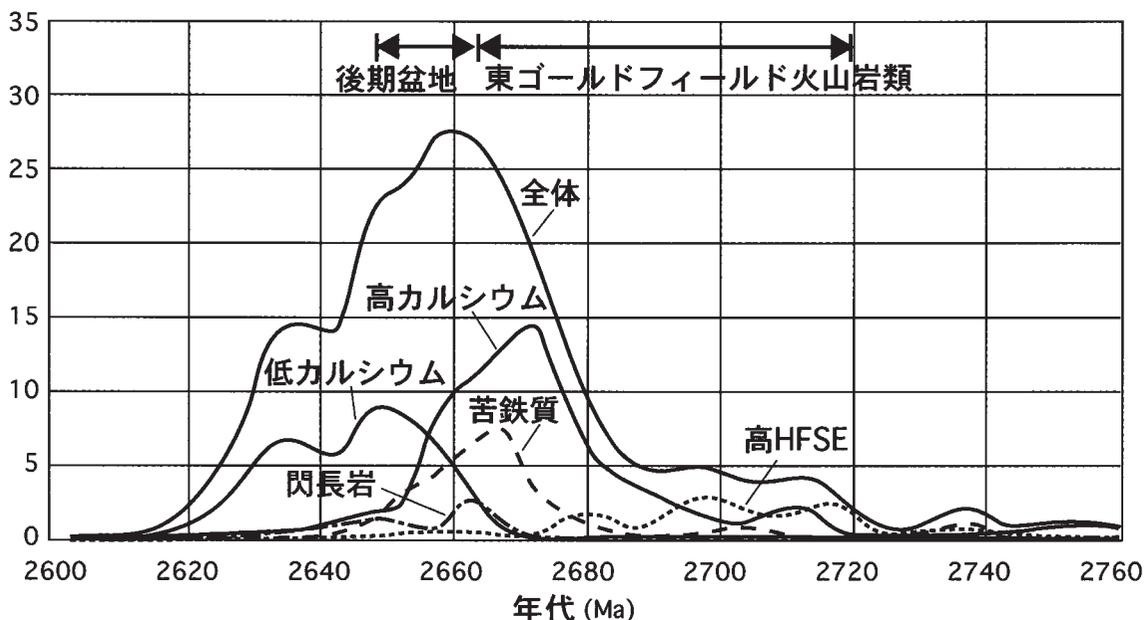
これら花崗岩類の年代論はジルコンのU-Pb年代を基本としてここ10年間に著しく進歩した。その総括によると、花崗岩類のタイプ別の年代ピークは高カルシウムタイプと、苦鉄質タイプが最も古い26.7億年前付近にピークを持ち、閃長岩タイプは26.6億年前付近で最大のピークを示す。低カルシウムタイプは26.5-26.3億年前と最も後期の年代を示す(第8図)。

花崗岩類の中で特に高カルシウム花崗岩類には碎屑性ジルコンが含まれていることが多く、それは28-29億年以上の年代を示す。この事実はグリーンストーン期以前の珪長質大陸地殻の存在を意味している。

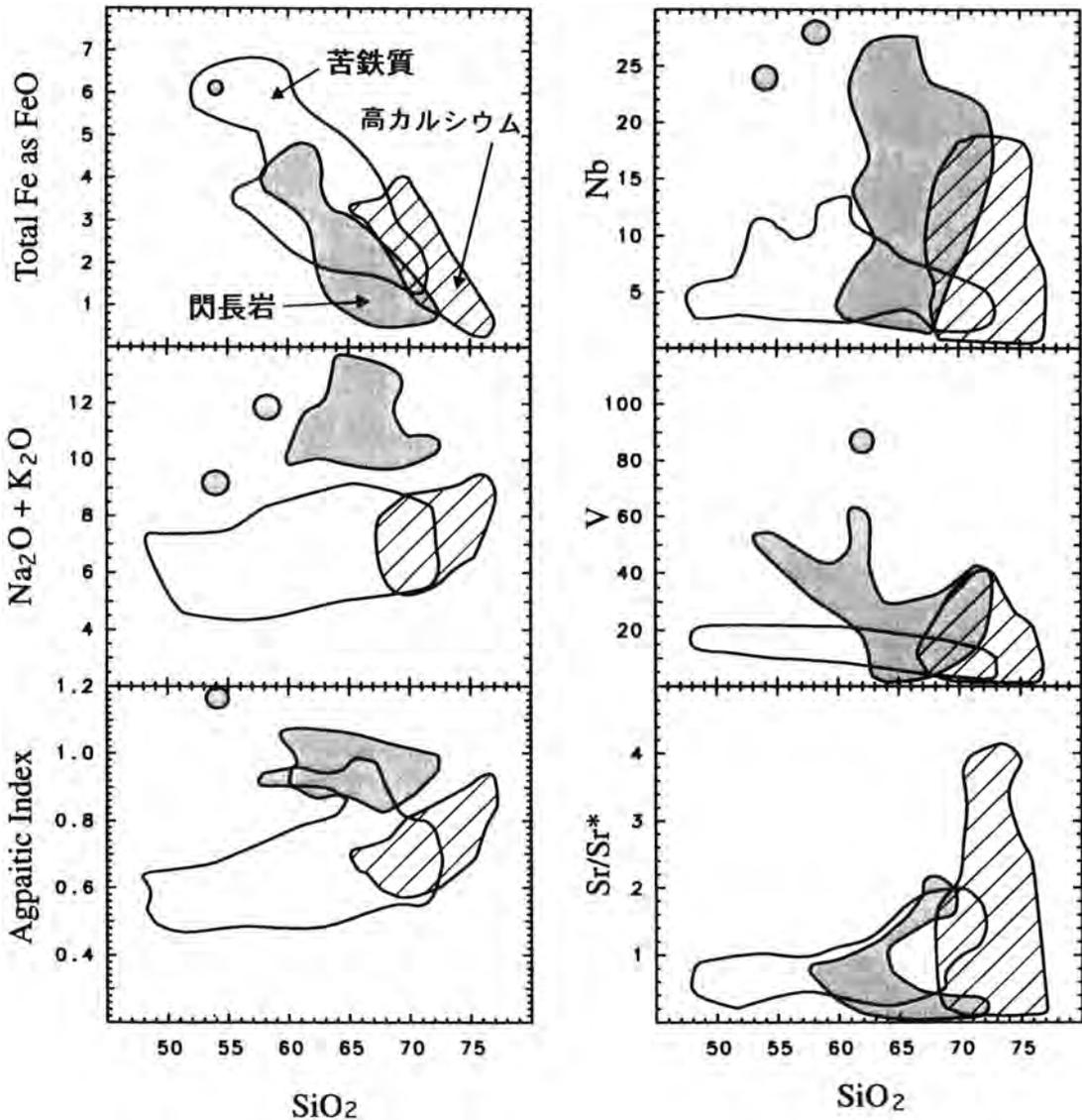
#### 4. 花崗岩類の地球化学

高カルシウムタイプはSiO<sub>2</sub> 68-76%, 高いAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を持ち(70% SiO<sub>2</sub>で>15%), Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>Oに乏しく(第9図), Na<sub>2</sub>Oは高~中程度, K<sub>2</sub>O, Rb, Pb, Th, Uは中程度である(第10図)。マントル初生値で規格化した多成分図で, Nb, P, Tiは負の異常を示す(第11図)。Y含有量に基づき次のサブグループに分けられる(Champion and Sheraton, 1997)。

高Yグループ(>25-10ppm): Nbが多く, Srは少



第8図 花崗岩類タイプ別のジルコン年代(Champion and Cassidy, 2002)。



第9図 高カルシウム、苦鉄質、閃長岩タイプ別のハーカー図 (Champion and Sheraton, 1997).

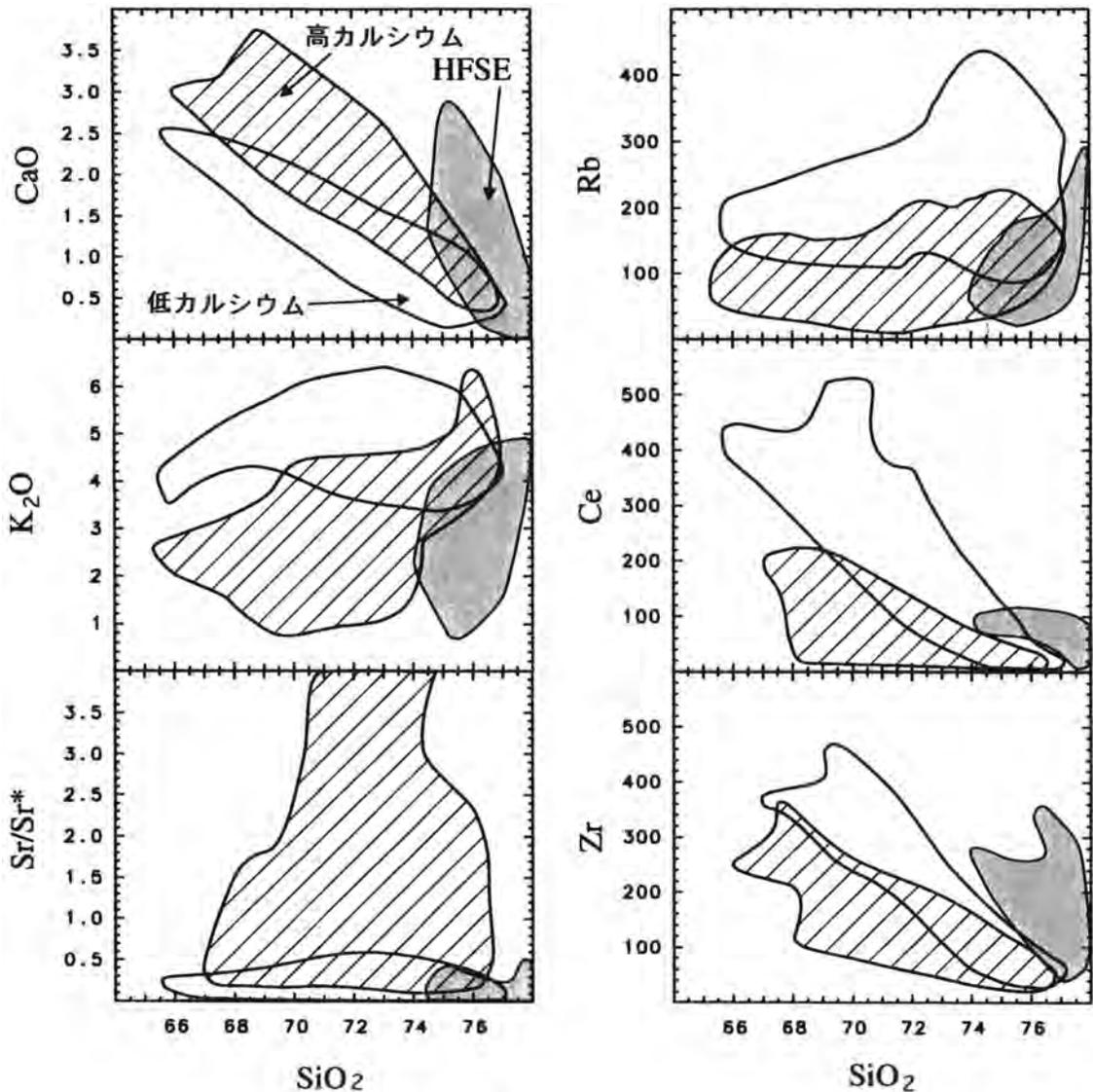
ない。LILE (Large-Ion Lithophile Element) に富み、Rb/Sr は常に低い (<2)。

低Yグループ (<10ppm) : Srが多い。LREEに富み、他のTTGのアダカイト質的性格を示すが、ここでは苦鉄質岩が少ない。

低カルシウムタイプは高カルシウムタイプと同じSiO<sub>2</sub> (68-76%)を持つが、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、Na<sub>2</sub>O、Srに乏しく、K<sub>2</sub>O、Rb、Pb、Th、U、Rb/Srに富んでいる(第10図)。LREEのLa、CeとHFSEのZrに著しく富む。Y含有量は10-30ppmであるが、一部では<10

ppmである。高カルシウムタイプよりRb/Sr値は高く、K/Rb比(100-150)は低いので、このタイプの生成には明らかに結晶分化作用が関与している。

高HFSEタイプは非常にSiO<sub>2</sub>に富む(>74%)。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は低カルシウムタイプと同様に低い。CaOとK<sub>2</sub>Oは高カルシウムタイプと同様である。他の花崗岩類より一般にTiO<sub>2</sub>、含鉄、MgO、Y、Zr、Nbに富み、Aタイプの性格を持つが、LILE成分、特にRb、Pbは中～低濃集である。Srが少なく、Yが多いため、マントル規格多成分図で著しいNb、Ti、Pの負異常



第10図 高カルシウム、低カルシウム、高HFSEタイプ別のハーカー図. Sr/Sr\* : 初生マントル値に規格化. Sr\*はCeとNd値の平均値 (Champion and Sheraton, 1997).

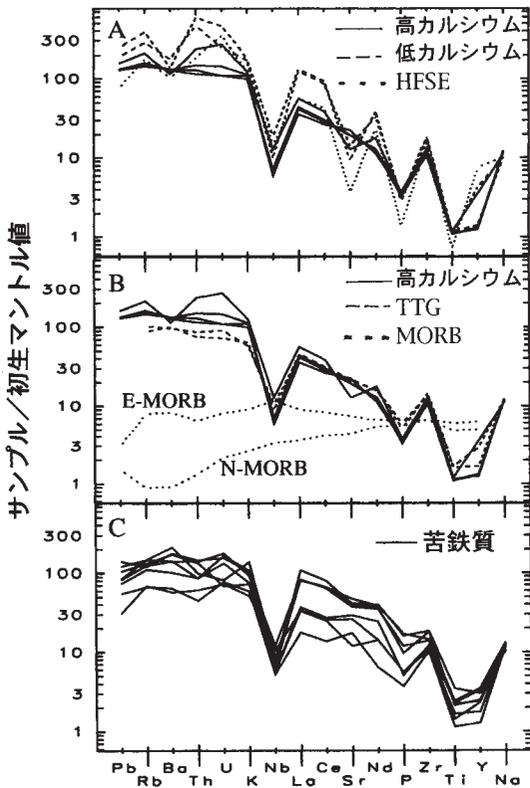
を示す(第11図).

閃長岩タイプはSiO<sub>2</sub> 50-73%であるが、高いアルカリ量(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O>10%)で容易に識別される(第9図). 一部で過アルカリ性、一般に低いmg値を持つ. TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, LILE, HFSE, REEの存在量変化は著しく、多起源のアルカリ岩からなることを暗示する. Zr, Y, Nb含有量, Ga/Al比は変化するが、一般に高く、Aタイプの性格を明示する.

苦鉄質タイプは幅広いSiO<sub>2</sub>含有量を持つ(>70-

50%). またLILE(K<sub>2</sub>O, Sr, Ba, Th, U, Pb)とLREE(La, Ce)も大きく変化するが、HFSE(Y, Zr)の変化は少ない. Yは一般に20ppm、苦鉄質岩で<8ppmと減少する. 初生マントル規格多成分図でNb, Tiが著しい負異常を示す(第11図).

Sm-Nd同位体比の総括によると、高カルシウムタイプは-1.3~+2.4(19試料)であるが、主に0.2~1.7の非常に狭い範囲を示し、このタイプが均質な起源物質から発生したマグマから晶出したことを示す. 同



第11図 花崗岩類タイプ別のスパイダー ダイアグラム。初生マントル値に規格化 (Champion and Sheraton, 1997)。

じくマントル モデル年代は28～29億年に集中し、これはインヘリタス ジルコン年代と重複する。苦鉄質タイプと閃長岩タイプも測定値は少ないが、高カルシウムタイプと類似の値を示す。したがってこれらのタイプの起源岩は比較的若い29-26.5億年前の年齢を持つものと考えられる。

一方、低カルシウムタイプは東部で初生的な  $\epsilon_{Nd} = 2.0$  を示し、西部方向のサザンクロス地区に向かって進化した値を表す (-4.5)。高HISEタイプ (-2.0～-1.1) もこの中に含まれる。この事実は低カルシウムタイプ マグマは東西方向に異なる年代の物質から発生し、東方で若い、西方では古い基盤物質が多かったことを示している。

### 5. 成因的考察

高カルシウムタイプは共通の性質を持つが、厳密

にはY, Nb, Srでやや異なる。その低Yグループは、始生代で一般的なTTGと共通の性質を示すので、これは斜長石が不安定でざくろ石が安定な高圧条件下の苦鉄質岩が溶融したものと考えられ、これは実験的に確かめられている。高圧の原因としてはスラブの深部への潜り込み、または大陸地殻の異常に厚い発達 (南米のプナ地域, 70km) によるものと考えられる。一般には大陸地殻40kmでざくろ石 エコロジャイトへの相変化が想定されている。

高カルシウムタイプをこの様な一般的なアダカイトモデルで説明するには、次のようにいくつかの難点がある (Champion and Sheraton, 1997)。

- (1) インヘリタス ジルコンの存在と比較的高い LILE 含有量。この2点を説明するためにはスラブ溶融モデルのみでは不可能で、堆積岩を沈み込みで入れるか、大陸地殻物質の風化を考慮に入れる必要がある。
- (2) 高カルシウムタイプには既述の如く高Sr/Yシリーズと低Sr/Yシリーズとがあるが、この事実は、これらマグマがエコロジャイトを含む幅広い圧力を経験した苦鉄質岩類の混在物から溶融したことを意味している。
- (3) 地震源探査によると (Drummond *et al.*, 1993), 現在のこの地区の大陸地殻は薄く40km以下で、かつ珪長質である。この事実は、高カルシウムタイプを作る苦鉄質エコロジャイトの存在を想定するには不都合で、地震源的に見えないものがあるか、あるいは下部地殻の沈降 (デラミネーション) などを想定する必要がある (Rudnick, 1995)。

高カルシウムタイプのSr/Y比を説明する成因モデルとしては、一般的な大陸地殻圧力下における含水溶融説 (Witt and Davy, 1997) が提案されている。これによると典型的なTTGが部分溶融し、ここにおける苦鉄質タイプの様な結晶分化作用を伴うと、高カルシウムタイプが生じる可能性がある。しかしこの説にも次の難点がある。

- (i) 水に飽和した部分溶融では実験的に非花崗岩的なメルトが生じる (Beard and Lofgren, 1991)。
- (ii) この地殻再溶融説ではレスタイトが岩体中に取り込まれているはずであるが、インヘリタス ジルコン以外には見当たらない。
- (iii) また高カルシウムタイプは量的に最大であるから、深部に苦鉄質な分化残存物があるはずで

あるが、なさそうである。

以上の様にこの地域で大部分を占める“TTG”に相当する部分の成因はスラブ溶融、地殻下部溶融、地殻中部溶融のいずれを採っても難点があり、今後の更なる研究が必要である。

一方、低カルシウムタイプは明らかに大陸地殻物質の再溶融で説明できる。Champion and Sheraton (1993)は低シリカTTGが原物質であろうと提案したが、トナル岩の地殻内条件下の溶融によっても(Skjervlie and Johnston, 1992)、低カルシウムタイプは生成し得る。この説が正しいとすると、トナル岩質大陸地殻がそれ以前に厚く発達していたことになる。

高シリカ含有量を持つHFSEタイプも同様に地殻起源と考えられる。この岩石の低いRbと高いBa含有量とは、部分溶融時に発生するマグマが少量であった可能性、あるいは結晶分化が進んでいた可能性を否定する。すなわち起源物質はLILEが低い、より珪質な起源物質であったものと思われる。

閃長岩タイプは一般のAタイプ花崗岩と同様な成因を持つと考えられる。すなわち、高熱流量の限られたゾーンにおける地殻物質の高温溶融説である。その他の可能性としては変質したマントル起源説である。当地域の閃長岩類は幅広いYb/Nb比(0.3-1.0)を持つから、同比が一定の典型的Aタイプ(Eby, 1993)とは異なっている。恐らく起源物質も多様であったものと考えられる。

苦鉄質タイプは、含まれるマントル包有物や地殻起源包有物の有無により起源の推定が可能である。LILEとLREEの分布パターンから見て、少なくともマントルと地殻起源の双方の要素、かつ共に似た $\epsilon$ Ndを持つことが必要である。一つの可能性は高カルシウムタイプと原岩が同様のもので、より苦鉄質でLILEに富む岩石が考えられる。

## 6. イルガン地塊の鉍化作用

イルガン地塊の鉍床は何と言っても多量の金の濃集であり(渡辺ほか, 1996)、最大のゴールデン鉍山(写真12)は1,400トンの含有量を持つ。これは主としてドレライトからなる破碎帯中の熱水性金鉍床である(口絵参照)。その他、100トン以上の金鉍床が17鉍山あり(第12図)、鉍業活動が州経済の中心であり、ロードトレインと呼ばれる長いトラックが走っており、追



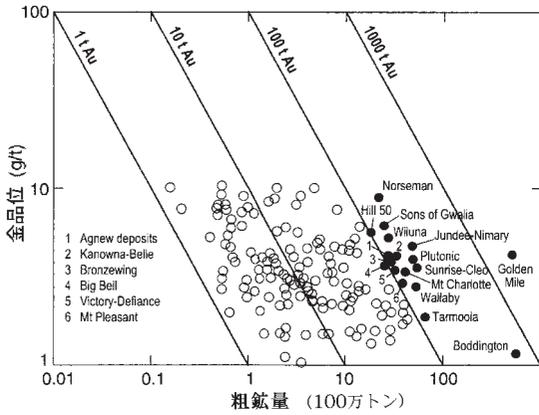
写真12 世界最大と称されるカルグーリのゴールデン鉍山のスーパーピット(鉍山資料による)。展望台があり、そこには金鉍石標本の展示がある。町の中心は上部。人口約3万人。

い越し時「注意」の警告もある(写真13, 14)。探査時のボーリングコアは州地質調査所に大切に保管されており、地質図の閲覧などを供与する体制なども非常に充実している(写真15, 16)。

### 6.1 金鉍床

金鉍床を胚胎する岩石について、Cassidy *et al.* (1998)は主要29鉍床のうち、花崗岩類を母岩とするもの15、表成岩類を母岩とするもの14を図示しており、双方が重要なことを示している。表成岩で好ましい母岩はB1Fから超苦鉄質火成岩類、ソレアイト玄武岩、ドレライト、泥質堆積岩類に及ぶ。

花崗岩類との関係では、サスカイト様の化学分析値を持つ苦鉄質タイプに伴われる例が多い。新生代の環太平洋地域ではアダカイトと鉍化作用との関連性が



第12図 イルガン地塊金鉱床の品位-鉱量図 (Hagemann and Cassidy, 2001).



写真13 西オーストラリア州名物、「道路列車」と呼ばれる長いトラック。



写真15 A rock collection, full of historyとして紹介された鉱山会社寄贈の州地質調査所のコア倉庫。



写真14 「道路列車」が54mに達するため、追越し時の注意を促す道路標示。



写真16 整備された地質情報と筆者らの訪問を伝えるKalgoorlie Miner紙。

指摘されている。イルガン地塊では最もアダカイト的な岩石は高カルシウムタイプである。このタイプは量的には多いが、それを母岩とする金鉱床は特に多くはないので、このタイプとの成因的關係は必ずしも明白ではない。

鉱化は石英脈、網状-鉱染状、交代鉱床、破碎帯などに著しい熱水変質作用と共に生じた。鉱床のほとんどはグリーンストーン/花崗岩境界付近に位置する。その主原因は破碎化などの適切な構造場がそこに得られたためと考えられる。

一般に、金鉱化作用は深部あるいは母岩に由来する変成熱水が循環して生じたものと思われる。金の究極の起源としては超苦鉄質岩類、あるいは変質上部マントル由来の苦鉄質岩などが一般に考えられている。

## 6.2 ニッケル鉱床

西オーストラリア州のニッケル資源の95%は初生的なもので、かんらん岩やダナタイトの貫入相に付随している。それは巨大断層と破碎帯に沿って産出し、上部マントルが28-27億年前に構造的に持ち上げられた部分に相当する。最大のニッケル鉱床はかんらん岩の噴出相に付随するカンバルダ鉱床であり、この鉱床はコマチアイト溶岩(ピクライト)の基底部に伴われる(Cowden and Roberts, 1990)。貫入岩相に伴われる鉱床(Agnew)はダナタイトレンズ中に割目規制を受けて鉱化作用が見られる(Myers and Hickman, 1990)。

## 6.3 レアアース鉱床

ラバートン南方約30kmには、最近話題のマウントウエルドのレアアース鉱床がある。これはグリーンストーン地域のラバートン構造帯沿いに貫入する、より後期(約20億年前)の原生代カーボナタイト-過アルカリ岩体であり、花崗岩類とは時代と成因ともに全く異なるものである。恐らくマントル起源のマグマから初生鉱床が生成したもので、それが二次富化作用を受けて地表下に高品位鉱体を形成する(石原・村上, 2006)。鉱床の詳細については、西川・藤井(1993)が既に本誌に紹介している。

この岩体はオーストラリア鉱物資源局の調査で空中磁気異常として発見されたものであるが、1980年代後半のイットリウムを契機とした超伝導素材ブームで

脚光を浴びて調査が進み(第1期レアアースブーム)、現在、再び磁性材料としてのレアアース需要の拡大から脚光を浴び(第2期レアアースブーム)、開発準備中の鉱床である。なお、出鉱は二次富化帯の高品位鉱を採掘して行われ、中国の山東省に運搬して精製すると伝えられていたが、ごく最近の情報ではマレーシアに変更されており、“脱バイユニオンボ”のペースとして期待が高まっている。

## 7. 結び-花崗岩マグマ発生の構造的背景

地殻起源の低カルシウムタイプと高HFSEタイプ花崗岩類は当地域の西部に古い大陸地殻が存在したことを示す。それは東方の若い大陸地殻とは恐らく漸移するか、両エンドメンバーの混在が考えられる。両者は化学的には類似しており、始生代に見られる一般のTTGと同様なものであろう。それは31億年前以降は島弧が側方に成長して生じたもので、26.6億年前以前には小プレートが結合して生じた。これらの再溶融により低カルシウムタイプは26.6-26.3億年前に生成した。

他方、大量の高カルシウムタイプは高压を受けたより苦鉄質な岩石が単時期(スラブ溶融)か複時期(肥大化下部地殻かレストタイト起源, Champion and Sheraton, 1997)の溶融によって生成したものと考えられる。その時代は26.9-26.4億年前頃である。

この時代の大量のマグマ発生は27.1億年前頃に生じたマントルブルームで生じた可能性があり、苦鉄質タイプは恐らくこの時期に発生した。ブルームの存在は一部でコマチアイト火山岩類が存在することからも明らかである。しかし、花崗岩の変形から見て主要な活動時期の構造場は圧縮場であり、マントルブルームの発生は早期の短期間であったものと思われる。

閃長岩タイプと高HFSEタイプは明らかに局所的な構造要素であるリフト帯の発生などに関連して生成した(Hallberg and Giles, 1986)。しかしその生成時期と構造運動との関連性を明らかにするためには更なる年代決定が必要である。

## 文 献

- Beard, J. S. and Lofgren, G. E. (1991): Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3 and 6.9 kb. *Jour. Petrol.* v. 32, 365-401.  
Cassidy, K. F., Groves, D. I. and McNaughton, N. J. (1998): Late

- Archean granitoid-hosted lode-gold deposits, Yilgarn Craton, Western Australia: Deposit characteristics, crustal architecture and implications for ore genesis. *Ore Geology Review*, v. 13, 65-102.
- Champion, D. C. and Cassidy, K. F. (2002) : Granites in the Leonora-Laverton transect area, northeastern Yilgarn Craton. *Geoscience Australia, Record*, 2002/18, 13-35.
- Champion, D. C. and Sheraton, J. W. (1993) : Geochemistry of granitoids in the Leonora-Laverton region, Eastern Goldfields Province. *Australian Geol. Surv. Organiz., Record*, 1993/54, 39-46.
- Champion, D. C. and Sheraton, J. W. (1997) : Geochemistry and Nd isotope systematics of Archaean granites of the Eastern Goldfields, Yilgarn Craton, Australia: implications for crustal growth processes. *Precambrian Res.*, v. 83, 109-132.
- Cowden, A. C. and Roberts, D. E. (1990) : Komatiite hosted nickel sulphide deposits, Kambalda. *In Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea*, Austr. Inst. Mining Metall., Monograph 14, 567-581.
- Department of Mines, W. A. (1990) : Geology and mineral resources of Western Australia. Geological Survey of Western Australia. *Geol. Surv. W. Australia, Memoir* 3, 827.
- Drummond, B. J., Goleby, B.R., Swager, C. P. and Williams, P. R. (1993) : Constraints on Archean crustal composition and structure provided by deep seismic sounding in the Yilgarn Block. *Ore Geol. Review*, v. 8, 117-124.
- Eby, G. N. (1993) : Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, v. 20, 641-644.
- Geoscience Australia (2004) : Magnetic anomaly map of Australia. Gradient enhanced residuals of total magnetic intensity. Scale 1:5,000,000, Geoscience Australia, Canberra.
- Hagemann, S. G. and Cassidy, K. F. (2001) : World-class gold camps and deposits in the Eastern Goldfields Province, Yilgarn Craton: diversity in host rocks, structural controls, and mineralization styles. *Geol. Surv. Western Australia, Record* 2001/17, 7-44.
- Hallberg, J. A. and Giles, C. W. (1986) : Archean felsic volcanism in the northeastern Yilgarn Block, Western Australia. *Australian Jour. Earth Sci.* v. 33, 413-427.
- 服部恵子 (2003) : 始生代の金脈鉱床。資源環境地質学：地球史と環境汚染を読む。資源地質学会, 45-54.
- 石原舜三 (2003) : 西オーストラリアのピルバラ始生代地塊に見る花崗岩類と金属鉱床: 特に酸化/還元状態の評価。地質ニュース, no. 588, 4-22.
- 石原舜三 (2004) : 縞状鉄鉱層と金鉱床: ブラジル, サンフランシスコクラトンの場合。地質ニュース, no. 600, 6-17.
- Ishihara, S. (2004) : The redox state of granitoids relative to tectonic setting and earth history: The magnetite-ilmenite series 30 years later. *Trans. Royal Soc. Edinburgh: Earth Sci.*, v. 95, 23-33.
- 石原舜三・村上浩康 (2006) : レアアース資源を供給する鉱床タイプ。地質ニュース, no.624, 10-29.
- 石原舜三・C. R. アンホイザー・L. J. ロブ (1998) : 最古の地殻形成: 南ア, パーバトン地域の緑色岩帯とトナル岩類。地質ニュース, no. 529, 40-59.
- Ishihara, S., Ohmoto, H., Anhaeusser, C. R., Imai, A. and Robb, L. J. (2006) : Discovery of the oldest oxidized granitoids in the Kaapvaal Craton and its implications for the redox evolution of early Earth. *Geol. Soc. America, Memoir* 198, 67-80.
- Myers, J. S. (1997) : Preface: Archean geology of the Eastern Goldfields of Western Australia - regional overview. *Precambrian Research*, v. 83, 1-10.
- Myers, J. S. and Hickman, A. H. (1990) : Pilbara and Yilgarn cratons - Regional geology and mineralization. *In Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea*, Austr. Inst. Mining Metall., Monograph 14, 129-133.
- 西川有司・藤井 昇 (1993) : オーストラリア マウントウエルド レアアース鉱床の特徴と鉱化作用。地質ニュース, no. 470, 6-17.
- Rudnick, R. L. (1995) : Making continental crust. *Nature*, v. 378, 571-578.
- Skjerlie, K. P. and Johnston, A. D. (1992) : Vapor-absent melting at 10 kbars of a biotite- and amphibole-bearing tonalitic gneiss: Implications for the generation of A-type granites. *Geology*, v. 20, 263-266.
- Smithies, R. H. and Champion, D. C. (1999) : Late Archaean felsic alkaline igneous rocks in the Eastern Goldfields, Yilgarn Craton, Western Australia: a result of lower crustal delamination? *Jour. Geol. Soc. London*, v. 156, 561-576.
- Smithies, R. H. and Witt, W. K. (1997) : Distinct basement terranes identified from granite geochemistry in late Archean granite-greenstones, Yilgarn Craton, Western Australia. *Precambrian Research*, v. 83, 185-201.
- Solomon, M. and Groves, D. I. (1994) : The geology and origins of Australia's mineral deposits. *Oxford Monograph Geology & Geophys.*, no. 28, Oxford Univ. Press, 951p.
- 渡辺 洵・上本 武・マリライナー (1996) : 西オーストラリア州における始生代の鉱化作用—金およびベース・メタル—. *資源地質*, v. 46, 299-312.
- Whitaker, A. J. (2001) : Naberu-Widgiemooltha region; Aeromagnetic interpretation. Scale 1:750,000, Australian Geological Survey, Canberra.
- Witt, W. K. and Davy, R. (1997) : Geology and geochemistry of Archean granites in the Kalgoorlie region of the Eastern Goldfields, Western Australia: a syn-collisional tectonic setting? *Precambrian Research*, v. 83, 133-183.

---

ISHIHARA Shunso (2007) : Chemical classification of the Archean granitoids: An essay to visit the Yilgarn Craton, W. A.

< 受付 : 2006年10月6日 >