

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

石原舜三¹⁾

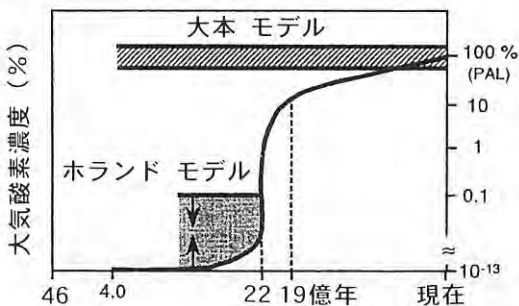
1. まえがき

始生代(24.5億年以前)の地球の大気は現在と違って非常に酸素が少なく還元的であったが、22億年頃から突然的に増加したと長い間信じられていた。これはいわゆるホーランド説である。ところが最近、その頃も今と余り変わらなかったとするモデルが大本洋教授より提案され(大本説, 第1図)、現在活発に討論されている(Ohmoto, 1997; Holland, 1999)。その提案に至る過程・現在の論点などについては渡辺(1998)が詳しく解説している。ごく最近のジオシムカ誌(GCA), 2001年11月号の表紙には古土壌の解析から描かれたホーランド説が掲載され、特集号としてH. D. Holland教授に献呈されている。一方酒井(1999, 図4-8)は両説の中間的な、始生代から大気中の酸素分圧が漸増したモデルを図示している。

大気中の酸素分圧は海洋にも反映されているはずであり、海洋底の沈み込み活動や火成活動を通じて、大陸地殻にも影響を及ぼす可能性がある。

そのように考えると大陸地殻の主要メンバーである花崗岩類は気圏・水圏・地圏の集積した性格を持つから、花崗岩からのこの問題に対する貢献も可能である。筆者はかつてカナダの先カンブリア紀花崗岩類の低い Fe_2O_3/FeO 比の報告に基づき、始生代には還元的な花崗岩類が卓越すると指摘したことがある(Ishihara, 1977)。ところが最近実地に調査すると必ずしもその様に単純では無いことが判明してきた。

たとえば南アフリカ共和国のバーバトン地域で31億年前には酸化型花崗岩類が大規模に出現することが明らかとなり(Ishihara *et al.*, 2002)、酸化的大陸地殻がその頃すでに南アには存在したことがはっきりした。南アと並ぶ古い地殻が存在する所として西オーストラリアがある。一昨年の第4回国際アーケアン討論会出席時に西オーストラリアの先カンブリア紀地塊の一部を見学することが出来た。ここではオーストラリアで最も古いピルバラ地塊の地質を紹介しながら、花崗岩類や鉱床の酸化・還元状態について考察してみたい。



第1図 地球における大気濃度の変遷(Ohmoto, 1997)。現在の大気中濃度(PAL)に対する割合で示されている。



写真1 キングス公園から見るパースの中心街。

1) 産総研 特別顧問

キーワード: ピルバラ, 始生代, TTG, 磁鉄鉱系, チタン鉄鉱系, 帯磁率, 重晶石鉱床



写真2 クリーム色の碎屑性石灰岩を基調とした西オーストラリア大学の校舎, Winthrop Hall.

2. 国際アーケアン討論会

国際アーケアン討論会 (International Archean Symposium, IAS) は西オーストラリア州の州都、パース(写真1)において1970年から10年ごとに定期的に開かれている。第3回は1990年9月17日～21日に実施され、オーストラリアから324名、国外20カ国から142名、合計466名の参加があった。397頁の巡検ガイドブック (Ho *et al.* ed., 1990)、および会議後436頁に達する講演集 (Glover and Ho ed., 1992) が、西オーストラリア大学出版物20号、21号として発行された。

今回の第4回は、会議前巡検が2001年9月15日～23日、本会議が西オーストラリア大学の校舎(写真2)を利用して9月24日～28日、会議後巡検が9月28日～10月5日の日程で行われた。出席者数は421名、オーストラリア人が最も多く283名、外国人は138名、そのうち日本人参加者は18名の多きに達した。この事実からオーストラリアや南極大陸などにおける日本人による研究が進展していることが伺える。

第4回討論会は2つの偶発的な事件で大きな影響を受けた。1つは9月11日にニューヨークで発生したテロ事件のために大本 洋教授を初めとする一部の北米の講演者の参加が急遽キャンセルされたことである。しかし情報化社会の恩恵によりテレビ講演に切り替えられ、同氏はあたかも会場にいるが如く講演を終了し、質問にも答えられた。第二はオーストラリア国内航空を運航するアンセット社が巡検直前に倒産したことである。このために広大な西オーストラリアの巡検を全てバス旅行するこ



写真3 ピルバラ巡検はパースからポートヘッドランドへ向けた18時間のバス旅行で始まった。車窓から見るハムスレイ盆地の堆積岩類。ここに世界最大の鉄鉱床地帯がある。



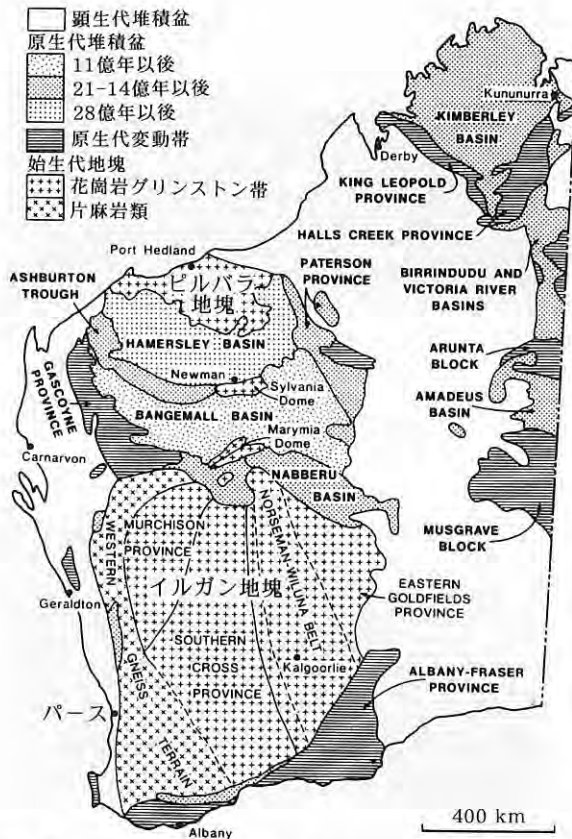
写真4 延々と連なるスピニフェックス草原。かんらん石が示すコマチアイトの急冷放射状～板状組織、spinifex texture (写真6)はこの草の形に由来する。

ととなるなど(写真3, 4)、波乱の幕開けであった。

第4回討論会では会議直前には、鉱物資源の大家である地元のD. Groves教授によるワークショップ「造山帯型の脈状金鉱床」が開かれた。これはメソサーマル型、タービダイト母岩型、アーケアン脈状型などさまざまな名称で呼ばれている金鉱床の総括的な解説であった。なお西オーストラリア州の鉱物資源の総括的な記述については渡辺ほか(1996)、高島(1972)などがある。高島(1972)によれば1960-70年代の西オーストラリア州は探鉱地域として重視されておらず、今日のピルバラ～イルガン地塊における多数の鉱床発見例を見る時、大変興味深い。

3. ピルバラ地塊の地質概要

西オーストラリアには2つの著名な先カンブリア紀の地塊がある(第2図)。北側のものはピルバラ



第2図 西オーストラリア州とピルバラ・イルガン地塊の位置 (Solomon and Groves, 1994).

地塊と呼ばれ、オーストラリアで最古の放射年代が得られている。南部に広く産するイルガン地塊はピルバラより少し若く、多数の金属鉱床を伴う。この両地塊は鉱物資源を求めて探査活動が活発に行われ、金・ダイヤモンド・ニッケルなどを中心に探査成果を挙げたのみならず、多くの地質情報が得られ (Geol. Surv. W. Australia, 1990; Solomon and Groves, 1994)、先カンブリア紀の地質の理解に大きく貢献した。

ピルバラ地塊は西オーストラリア州の北西端にあり、南北に約400km、東西に約600km、卵形である。この地塊は初期-後期始生代 (37.2-28.5億年)の花崗岩類とグリーンストーンを基盤とし、これを不整合に覆うハマスレー盆地の一部である弱変成-弱褶曲火山・堆積岩類からなるマウント ブルース層群から構成される。集落は殆どなく、巡検は基本的にはテント生活 (写真5) であった。

最古の基盤はこれまでピルバラ ブロックまたは



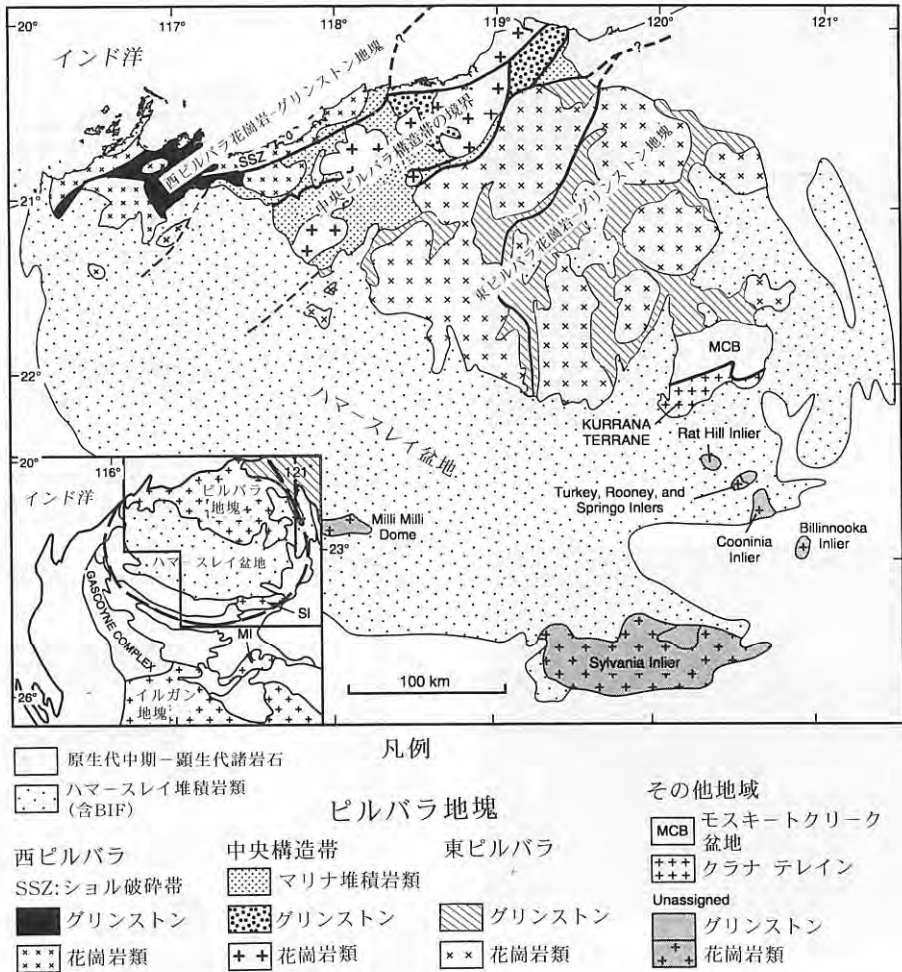
写真5 ピルバラ巡検の宿。河畔に樹木を求めて宿泊地を設定する。乾燥しており“早春”の巡検には蚊帳も不必要であった。

北ピルバラ花崗岩-グリーンストーン帯と一括されているが、最近10年間のプロジェクト研究によって層群、年代、構造が異なる3帯から成立していることが明らかになった (第3図)。

- (1) 東ピルバラ花崗岩-グリーンストーン帯 (EPGGT) の形成。35.2-32.4億年のピルバラ地塊最古の大陸地殻。これは37.2億年の最古の珪長質地殻上に形成され、28.5億年に至る後続の変動を経験した。
 - (2) 西ピルバラ花崗岩-グリーンストーン帯 (WPGGT) の形成。これは前者より少し若い32.8-29.2億年前に形成した。
 - (3) 中央ピルバラ構造帯における30.1-29.4億年のマリナ盆地の形成。これは西縁では主に火山岩類 (ホイム クリーク層群とブックインガラ層群)、その他の地域では主として碎屑堆積岩類 (コンスタンチン砂岩、ドグレイ層群のマリア累層) の生成で特徴づけられる。この堆積作用は大陸間リフト沿いに3回にわたり生じ、花崗岩の貫入とそれによる変形を29.5-29.3億年に受けている。
- その他、なお詳細不明のものとして南東端のクラナ帯、その北西側のモスキート クリーク盆地 (33.1-28.5億年堆積物) がある。

4. 東ピルバラ地塊のグリーンストーン複合体

東ピルバラ地塊は35.2-32.4億年の火山岩・堆積岩類と35.8-28.5億年の花崗岩類 (トロニウム岩-モンゾ花崗岩) からなり、付随する鉱床としては



第3図 ビルバラ地塊における花崗岩質岩体と構造区分 (Van Kranendonk *et al.*, 2001).

縞状鉄鉱層 (BIF) と金が著名である。地塊は35-120kmの直径を持つ卵形の花崗岩類で特徴付けられ (第3図)、岩体間に一般には急傾斜の火山岩・堆積岩類が分布する。両者の関係は不整合または貫入関係である。火山岩類は一般には向斜構造、稀に単斜構造を持つ。

4.1 最古の放射年代

地球上の最古の岩石は火成岩である。オーストラリアの火成岩類の最も古い放射年代は東ビルバラ地塊で最初に得られた。それはSm-Nd法のモデル年代であり、ワラウナ層群火山岩類の35.60 ± 0.32 億年 (Hamilton *et al.*, 1981) および37.12 ± 0.98 億年 (Gruau *et al.*, 1987) であった。その後、パノラマ層群の捕獲変晶状ジルコンから ~37.2 億

年が得られ (Thorpe *et al.*, 1992)、この年代の頃、既に古い地殻があったと考えられた。

花崗岩類についてはワラウギン岩体の密に褶曲している片麻岩状トナル岩の包有物のジルコンから 36.55 ± 0.06 億年, 36.37 ± 0.12 億年, 35.95 ± 0.04 億年, 35.76 ± 0.06 億年 (これが貫入年代) が得られている (Nelson, 1999)。その他のジルコン年代は36.5 億年, 35.8 億年, 35.3-35.0 億年付近に集中する。アベックス玄武岩中に夾在する珪岩の碎屑性ジルコンは36.5 億年と35.8 億年の年代を示し、それ以前に珪質大陸地殻が露出していたことが明らかである。

4.2 最初の火山活動。苦鉄質火山岩類

東ビルバラに現存する最古の火成岩類は苦鉄質

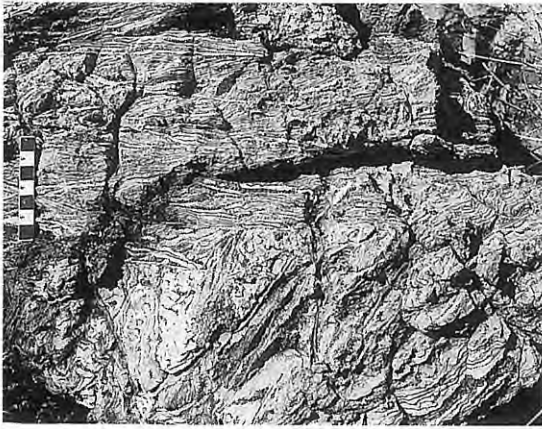


写真6 かんらん石が刃状に連なるコマチアイト (bladed komatiite), 多重変形が著しい、バンブー クリーク 破碎帯。

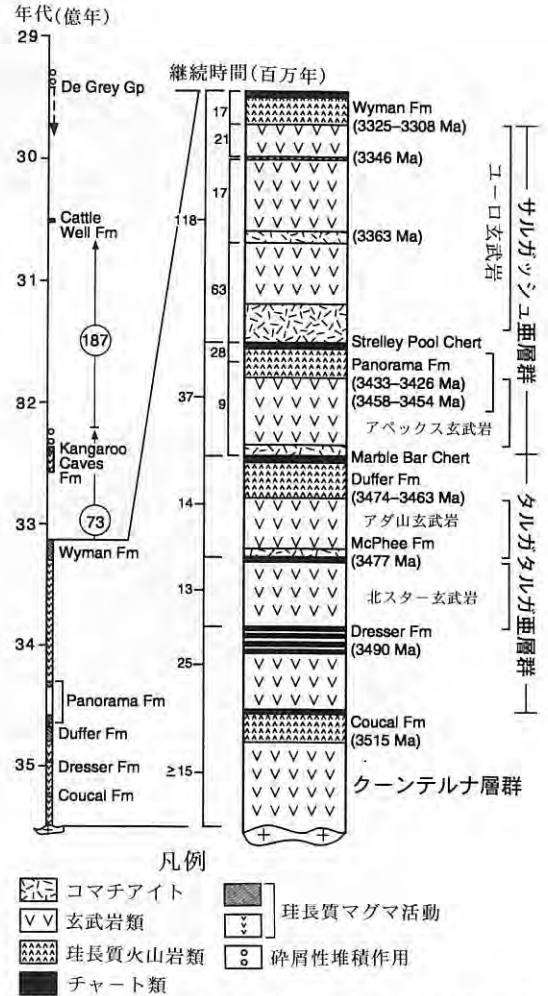


写真7 ワラウナ層群中の高Mg玄武岩の枕状溶岩 (北シャウ岩体周辺)。

火山岩類である。それは下記のように分けられる (第4図)。

35.2億年以前の最下部玄武岩層 (クーンテルナ層群) : 層厚5.9km。主にソレアイト玄武岩類と少量の珪長質火山岩類, その最上位を珪長質火山岩類とチャート (コウカル累層), さらに玄武岩が覆う (第4図)。34.9億年以降はワラウナ層群 (写真6, 7) と呼ばれ, 玄武岩類を主とし, チャート・珪長質火山岩類を挟在する。この層群は下部のタルガ タルガ 垂層群と上部のサルガッシュ 垂層群に分けられる。

タルガ タルガ 垂層群はドレッサー 累層 (主にチャート) の堆積に始まり, 北スター玄武岩類の噴出, マックフィー 累層 (チャート・コマチアイト) の挟みを経て, アダ山玄武岩の噴出, ダッファー 累層の珪長質火山岩活動で終了する。その最末期に赤色が特徴的なマーブルバー チャート (表紙・口絵参照) の

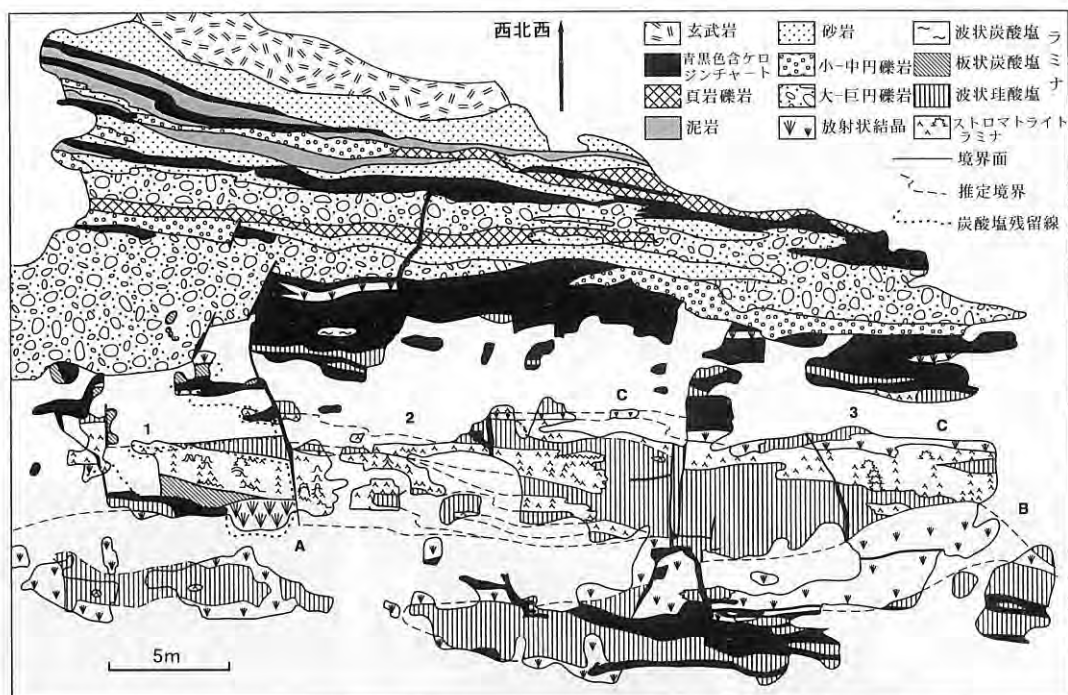


第4図 東ピルバラ地塊のグリーンストン下部, 層の模式断面図 (Van Kranendonk et al., 2001). 円中の数字はマグマ活動継続年数 (100万年)。

堆積があり, これは鍵層としてマッピングに広く活用される。

サルガッシュ 垂層群の下部では, 枕状玄武岩類 (アベックス玄武岩) が珪長質火山岩類のパノラマ 累層に覆われる。その上位にストロマトライト・炭酸塩鉱物・硫酸塩鉱物を含むストレリ プール チャートが挟在する (写真8-10)。これらチャートは, かつては静かな蒸発作用が著しい浅海域で生成したものと考えられていたが, 最近ではカルデラに伴う熱水活動で沈殿したものとする解釈が一般的である (第13図参照)。

以上のようにピルバラにおける最古の火山岩類



第5図 トレンダル産地における最古のストロマトライトの産状 (Van Kranendonk et al., 2001).

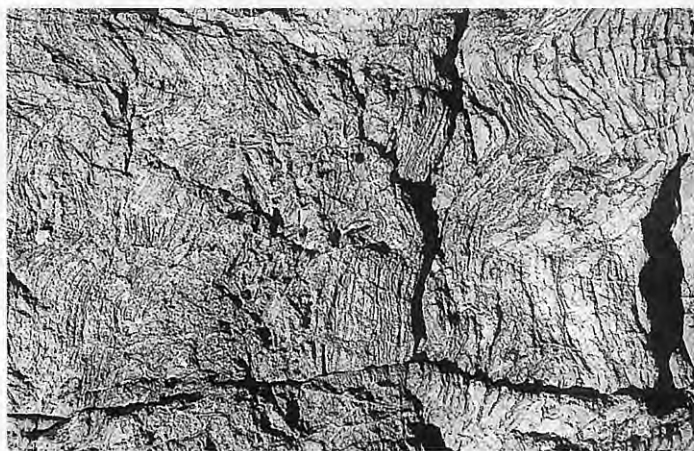


写真8 ノースポールドーム、ストレププルチャート中の葉理組織。最古のストロマトライト？

は、玄武岩が主体で、少量のコマチアイトと珪長質火山岩類を伴う。堆積岩類は全てチャートで、碎屑岩はまだ現れておらず、僅かにインヘリタスジルコン結晶が認められるのみである。極く少量ながらも硫酸塩鉱物・炭酸塩鉱物層が存在する。

4.3 珪長質火山岩類と碎屑岩類

33.1-32.3億年のワイマン累層の時代には流紋質岩類が卓越する。これは層厚0.5-1.1kmである(写

真33)。場所によっては最上部にストロマトライト、チャート、熱水性黒色チャートを持つ。これと同時にと思われる地層には局部的に縞状鉄鉱層(BIF)が挟在する。西オーストラリアではこれが最古のBIFである。

32.6-32.4億年のサルファー・スプリングス層群は下位から石質ワッケ、珪長質火山性ワッケ、珪長質火山性砂岩、凝灰岩、デイサイト(以上がレイリラ累層)、コマチアイト、高Mg玄武岩、チャートからなる

クナグナリナ累層(層厚2.4km), 玄武岩, 安山岩, 流紋岩質岩, チャートからなるカンガルーケイブ累層(層厚1.5km)である。

一部で32.35億年を示すゴルグ クリーク層群が発達する。これは縞状鉄鉱層(BIF)の発達で特徴づけられ(写真16-18), 一部では採掘されているほどである。このほかチャート, 含鉄頁岩, 碎屑性堆積岩類, 玄武岩からなる。

その他に30.0-28.4億年のド グレイ層群の形成。これは局部盆地に堆積した粗粒の碎屑岩類からなる。ピルバラ地塊南東部のモスキート クリークが代表例である。

4.4 最古の化石

地球上最初の生物体として, バクテリアが関与して生成したと考えられるストロマトライトがある。これはピルバラ地塊では, ドレッサー累層(35.0億年)およびより大規模にはパノラマ累層(33.3-34.3億年)を整合的に覆うストレリ プール チャートに産出する(写真9-10)。ここでは珪質板状ラミナ層準にストロマトライト組織が認められる(第5図)。ストロマトライトは現代の高等植物の葉緑体と同様に, 光合成によって酸素を発生する地球上最初の前核生物と考えられているシアノ バクテリアの化石であり, 地球表面の酸化現象に関して, その持つ意味は大きい。



写真9 ストレリ プール チャート(34.3億年)。黒色の有機物を含み還元的。



写真10 ストレリプール累層中の割れ目に成長する自形重晶石結晶。



写真11 明瞭な鍵層となるマーブルバーチャート層。左側が上位で、ここでは地層が逆転している。

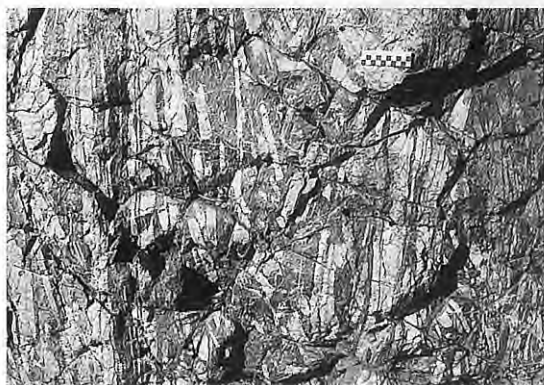


写真12 白黒バンディングを示すマーブルバーチャート層。



写真13 ゴルジ クリーク層群, パティ マーケット累層中の縞状鉄鉱層。



写真14 ドレッサー累層中のリップルマーク。



写真17 不整合面のクローズアップ。スケールより上が縞状鉄鉱層の基底礫岩。



写真15 ドレッサー累層中の黒色チャートを切る重晶石脈 (Ba)。



写真18 サンライズヒル鉄鉱山の採掘後の西ピット。

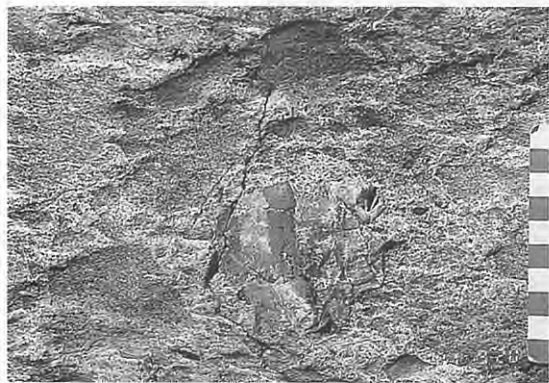


写真16 サンライズヒル鉄鉱山で基盤の花崗岩類(下部)を不整合に覆う縞状鉄鉱層(最上部BIF)。



写真19 ダッファー累層の珪長質火山岩類中の3色チャートの捕獲岩片。

この模式地、ノースポールドームのトレンダル産地からは巨大標本が西オーストラリア博物館により採取され、展示されている。採掘時には世界中から専門家を招いて、それが生物活動によるものか

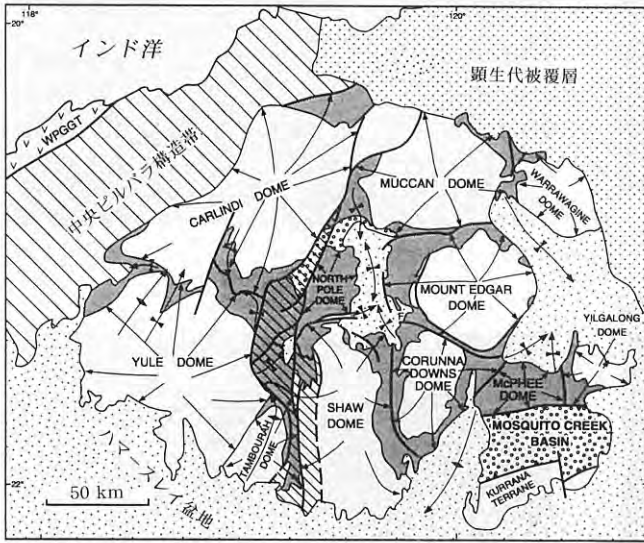
否かについて判定会議を持ち、バクテリア起源と認定されたそうである。その結果はABCテレビのドキュメンタリービデオ、「地球上で最古の生命」として収録、放映された。

5. 東ピルバラ地塊の花崗岩類

5.1 花崗岩類の概要

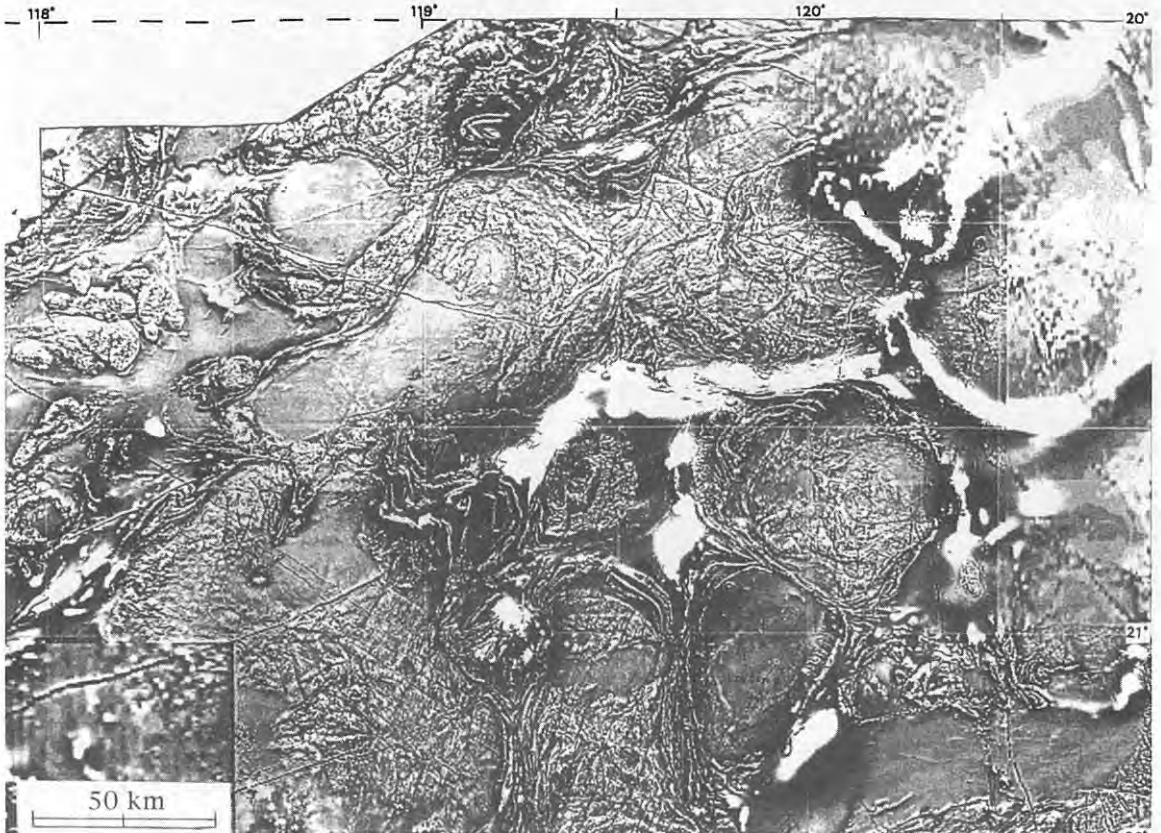
花崗岩類は円形～楕円形の9岩体からなる(第6

図)。一般的にドーム状構造を持ち、面構造は周辺部～外側に傾斜する。局部的には逆転する。花崗岩/火山岩の接触部は貫入関係(コルナ ダウンス、シャウ北部、カーリンディ南部、マウント エドガー北



- 凡例
- フォーテスキュ層群
 - ド グレイ層群
 - 花崗岩類
 - グリンストーン
 - ▨ ライラ ルークー西シャウ構造コリド
- 地質境界線
- 断層
- ⇄ 逆断層
- ⇄ 向斜軸
- ⇄ 背斜軸

第6図 東ピルバラ地塊における主要花崗岩体とその周辺の諸構造 (Van Kranendonk et al., 2001).



第7図 東ピルバラ地塊における空中磁気異常 (Blewett et al., 2000).

東部など)、破碎帯(マウント エドガー南西部、シャウの東部と西部)、若い地層との不整合関係(シェイギャップ グリンストン帯)などである。花崗岩岩体は大局的には卵形であるが、接触面は極めて複雑な形をとることがある。ユルとマウント エドガー岩体ではルーフの角閃岩とオーソ片麻岩が脈状配列する。コルナ ダウンス、シャウ岩体の周辺では、岩塩層のダイアピール現象と同様な現象が見



写真20 マッカラン花崗岩複合体(34.7億年)の露頭遠望。

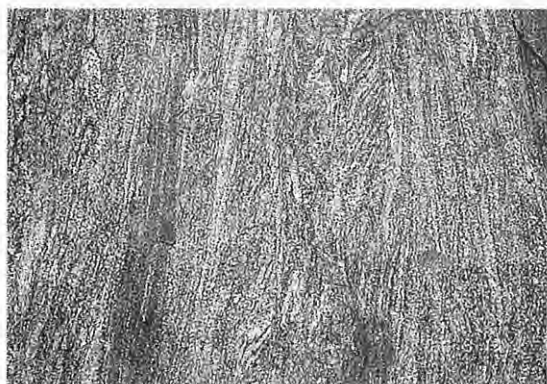


写真21 マッカラン花崗岩体の多重変形が著しい部分。



写真22 同、変形が弱いモンゾ花崗岩中の捕獲岩片。

られる。

この点は空中磁気図からも明らかであって、比較的平坦な花崗岩体を複雑な皺しわを持つグリンストン帯の諸岩石が取り巻いている(第7図)、また次の諸点が明らかである。

(イ) 花崗岩体とグリンストン体の組織が著しく異なる。



写真23 コルナ ダウンス岩体(33.2-33.1億年)-1:一般に変形が少ない粗粒モンゾ花崗岩。



写真24 コルナ ダウンス岩体-2:斑状花崗岩。

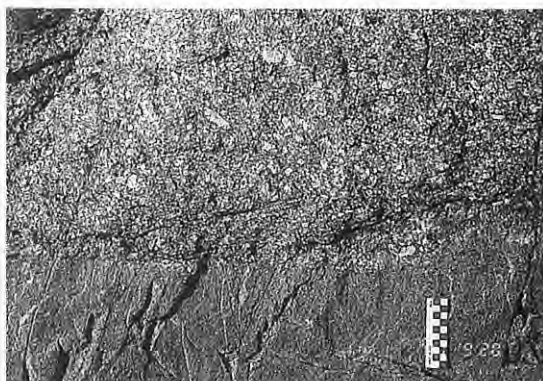


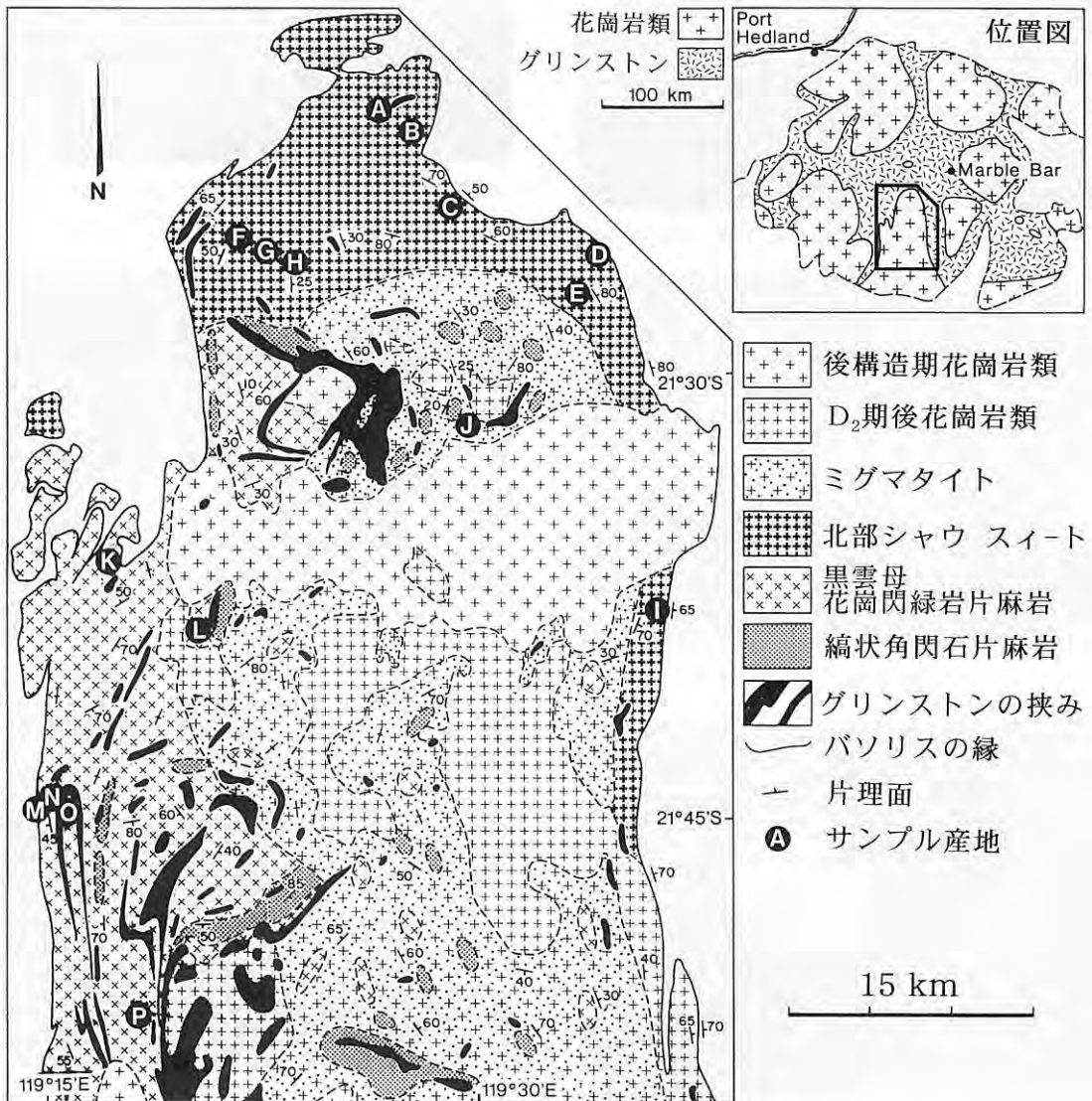
写真25 コルナ ダウンス岩体-3:斑状岩と細粒花崗岩岩脈。

第1表 東ピルバラにおける各岩体ごとの時代別比率 (Van Kranendonk *et al.*, 2001).

年代 (億年)	ユルカルリンディ	シャウ	コルナ ダウンズ	マウント エドガー	マッカ	ワラワジン
28.50	10%	??	15%	0%	1%	0%
29.3	75	?	15	0	0	0
32.47	~10	0	0	0	20	20-30
33.12	0	0	0	95	50	10
(ワイマン累層相当)						
34.55	~5	?	70	5	30	70
(パノラマ累層・ダッファー累層相当)						
35億年以前	0	0	0	0	0	1

り、花崗岩体内部に細かいファブリックが見える。
(ロ) 直線的な組織は割れ目か岩脈である。
(ハ) 幅広く連続する組織は北東系の破碎帯である。

花崗岩類の年代は一般に岩体周縁部で古く、中心へ若い年代を示す傾向がある。ワラワジン岩体を除く全ての岩体は、35.0-34.1億年の年代を持つ片麻岩状-片状TTG (トナル岩-トロニエム岩-花崗閃緑岩) を含むのみならず、33.2-33.0, 32.5-32.4, 29.4, 28.5億年などの若い年代を持つ岩相を含んでいる。これら岩相の比率は第1表のとおり



第8図 シャウ岩体中北部の地質図 (Bickle *et al.*, 1983).

である。

注目すべきはシャウ岩体では最も古い岩相である34.9-34.1億年のTTGの割合が最も高い(70%)、コルナダウンス岩体では次いで古い33.2億年花崗岩類が95%を占めることである。最も古い年代、35.8億年はワラワジン岩体の片麻岩で得られている。一方、若いグループは東部のユル、カーリンディ、ピピンガーラ岩体などがある。

各岩体は年代のみならず岩相上も変化に富んでいる。シャウ岩体では(第8図)層状あるいは大きなレンズ状のグリーンストーンが黒雲母花崗閃緑岩質片麻岩(灰色片麻岩)やミグマタイト中に取り込まれる。縞状角閃石片麻岩も同様な産状で分布し、これはハイブリッド化を受けたグリーンストーンである可能性がある。北部シャウ岩相は中～粗粒花崗閃緑岩、斜長石斑岩を伴うほか、微量の石英閃緑岩・トナル岩を含む。南西部に露出する灰色片麻岩も同様に花崗閃緑岩質であり、固結時の構造運動のため片麻状を呈したものであると思われる。シャウバソリスはカルク-アルカリ岩系に属し、その化学的性質は顕生代のそれとよく似るが、HREEに乏しく、Ni、Crに富む傾向がある。全岩分析値によると、主力の花崗閃緑岩は $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 比が0.5より低く、チタン鉄鉱系である。北部ショウ岩相の花崗閃緑岩は11



写真26 北シャウ岩体：露頭遠望。

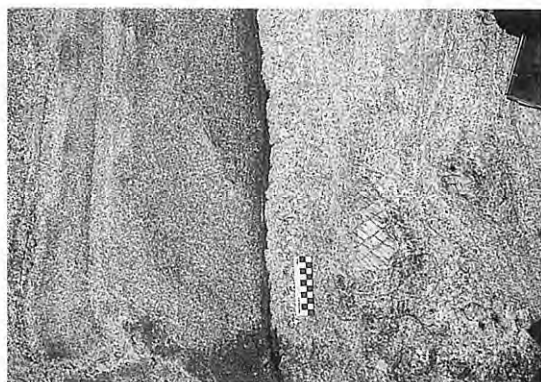
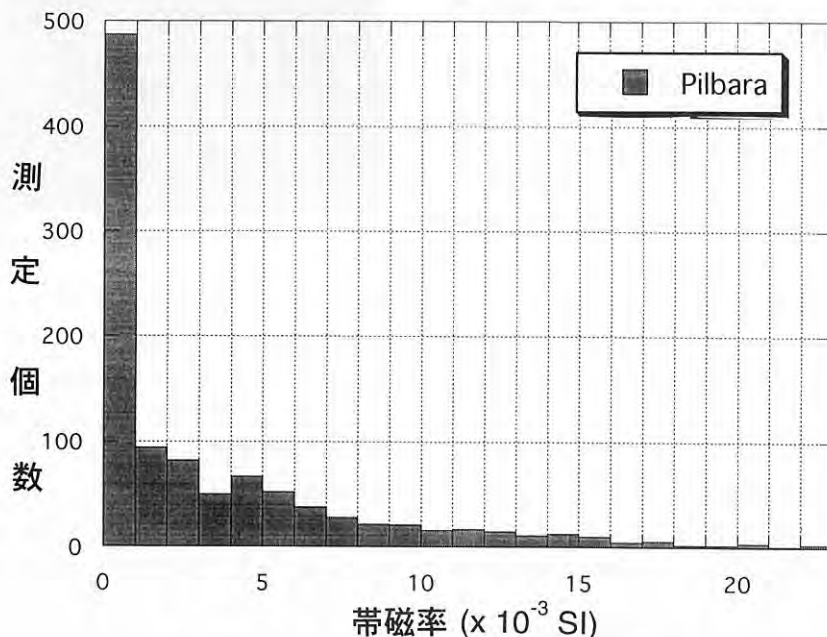


写真27 同岩帯：優白花崗岩のdiatexite(地殻再熔融花崗岩)。



第9図 ピルバラ地塊花崗岩類の帯磁率(D. Champion氏提供)。

個中の7個が $Fe_2O_3/FeO = 0.62 \sim 1.0$ で磁鉄鉱系に属するがその値は低く、4個が $0.35 \sim 0.48$ のチタン鉄鉱系の値を示す。

5.2 帯磁率からの評価

ピルバラ地塊の化学成分は全鉄で報告されていることが多く、鉄の酸化/還元状態を知ることが難しい。限られた情報によると、前述のように Fe_2O_3/FeO 比は磁鉄鉱系/チタン鉄鉱系の境界値0.5を越えるが、その値は大きくはない。また空中磁気図によっても花崗岩類は大きな磁性岩体としては現れていない(第7図)。ジオサイエンス オーストラリアのDave Championはピルバラ地域の花崗岩類について多数の帯磁率を測定している。同氏の好意により提供された結果をヒストグラムで第9図に示す。測定試料のほとんどは花崗岩と花崗閃緑岩であり、少量のトナル岩・石英閃緑岩と記載されている。この図から次の諸点が明らかである。

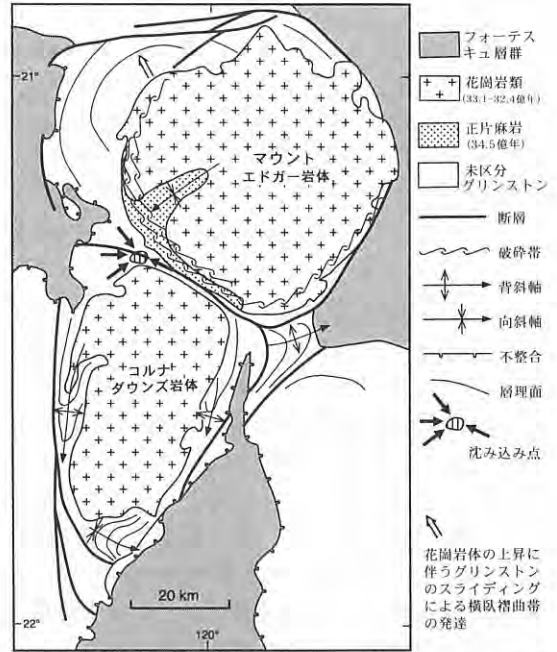
- (1) 帯磁率は 1.0×10^{-3} SI以下の低いものが多い(全体の47.0%)、チタン鉄鉱系に属する 3.0×10^{-3} SI以下の値は全体の63.7%を占める。
- (2) 磁鉄鉱系($>3.0 \times 10^{-3}$ SI)も、その帯磁率が $3.0 \sim 7.0 \times 10^{-3}$ SIの低い値を示すものが多い(19.5%、これは磁鉄鉱系全体の53.8%)。すなわちこれらは磁鉄鉱系であるよりも中間系列に属する可能性を含んでいる。

結論的にピルバラ地塊の花崗岩類は還元的であると言える。なお、測定試料の一部には片麻構造を持つものがあるが、塊状岩相と較べて特に有意の差は認められない。ペグマタイトは少数個数であるが、低い帯磁率を示し、これも還元的である。

5.3 構造運動と変形

東ピルバラ地塊には2種類の広域的な構造がある。一つは前述の花崗岩-火山岩に見られるドームとベーズン構造であり、他の一つはラーラーク〜西ショー-破碎コリドーの存在である。後者は29.4億年前の左横ずれ圧縮活動で生じた。

ドーム/ベーズン構造に関するものは一般に急傾斜のグリーンストーン境界と平行、一部斜交の関係を持つ。花崗岩体に直近のグリーンストーンは角閃石-緑色片岩相の接触変成相を持つ。花崗岩体を離れると、貫入に伴う面構造は消滅する。この事実は貫



第10図 マウント エドガー/コルナ ダウンズ岩体周辺部の変形運動(Collins, 1989)。

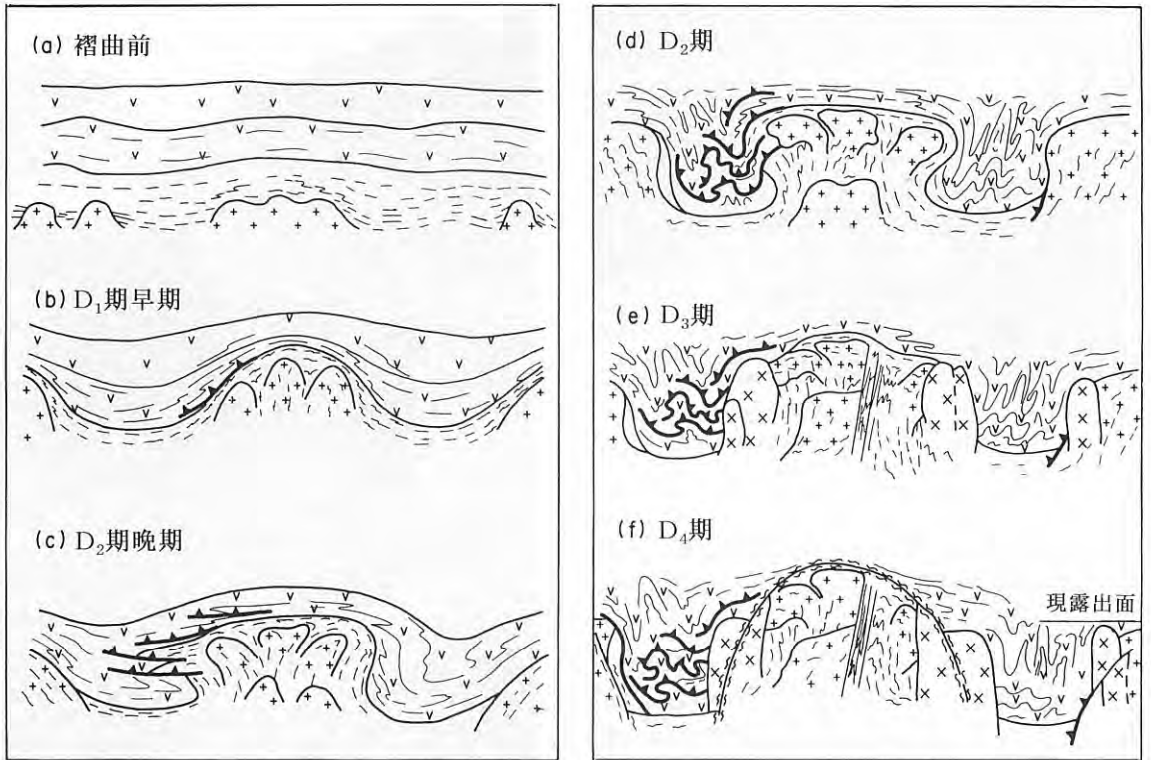


写真28 同岩体:片麻状花崗岩。

入に伴う熱と破碎作用の減少、または火山岩の時代が若く異なることを意味する。

東ピルバラ地塊の主要構造の変成期は時代順に $D_1 \sim D_6$ 期に分けられる。 D_1 期は34.9-34.1億年前であり、主に正断層運動である。その一部はチャート-重晶石脈により埋められ、これは亜火山性ラコリス貫入に伴うカルデラ壁の割目を充たしたと思われる。また一部で地層の傾倒をもたらした。

D_2 期の変形は33.3-33.1億年のワイマン累層に属する珪長質火山活動および花崗岩類の貫入に伴うもので、マウント エドガー(写真28)の場合は岩体



第11図 マウント エドガー岩体の構造発達模式図 (Collins, 1989).



写真29 D₄期のトナル岩質オーソ片麻岩。シャウ岩体西縁に現れるムルガンディナー破碎帯(29.4億年)中に産出,

南縁に幅1-3kmの馬蹄形の破碎帯が生じ、花崗岩側が上昇している(第10図)。花崗岩はここではオーソ片麻岩に変わっている。片麻構造と破碎作用は

北東へ向けて消滅し、一部ではポーフイー型のCu-Mo鉱化作用が見られる。

D₃期の変形は32.4億年前の花崗岩活動に伴うも



写真30 グリンストーン帯の沈み込み部の中心であるワラウーナ向斜軸に垂直に発達するLテクトナイト。原岩はチャート。

ので、断層運動、それに伴う火成鉍化活動、カルデラと付随する角礫岩の生成、若干の褶曲作用、ドームと盆地の発達などである。

D₄期の変形は29.4億年前のローラ ルーク-西シヤウ構造性コリドーの発達に伴うものである(写真29)。このコリドーは北東-南西方向の軸を持つ褶曲、北北西方向の左横ずれ断層と破碎帯、北東方向の右横ずれ断層の組み合わせを持ち、これらは北西-南東方向に最大圧縮軸を持つ構造場で生じたものである。

D₅期の変形は28.9億年前に北東方向の左横ずれ断層運動に基づくものである。マウントヨークなどでは、この断層に鉍化を伴う。しかし同じ時代の変形を受けていないSn-Ta花崗岩も存在する。D₆期の変形は27.8-26.3億年前の玄武岩活動期に相当する。この火山岩に覆われるドーム・盆地構造が、再度のドーミングを受けている。

マウント エドガー岩体とその周辺の構造発達史はCollins (1989)によって模式的に第11図のように示されている。

6. ピルバラ地塊の鉍床

始生代地塊には一般的にペグマタイト鉍床が多い(石原,2003)が、ピルバラ地塊には金属鉍床が卓越し、東ピルバラ、マリナ、西ピルバラなどの地域に多産する(第12図)。鉍化作用はクーンテルナ層群では弱く、ワラウーナ層群では著しく、特に脈状金鉍床と火山岩母岩塊状硫化物鉍床(VHMS)と

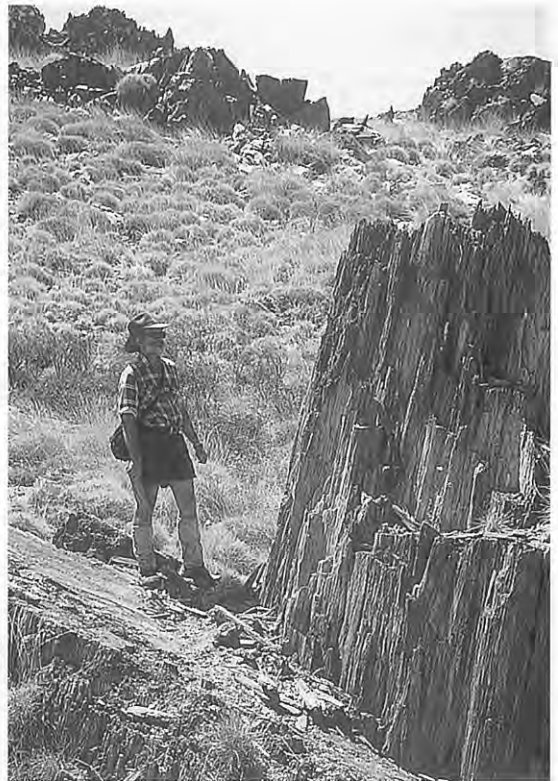


写真31 同:クローズ アップ。劈開面は全方向に発達。故に垂直方向に引き伸ばされた時に全方向からの力を受けた。

第2表 ピルバラ地塊の金鉍床の母岩別鉍量(Huston et al., 2001)。

母 岩	生産量 (トン)	推定鉍量 (トン)	合計 (トン)	割合 (%)
超苦鉄質-苦鉄質火山岩類				
東ピルバラ-34.2億年	18.76	13.00	31.76	36.7
東ピルバラ-29.0億年	3.82	0.18	4.00	4.6
西ピルバラ	0.18	0.74	0.92	1.2
タービダイト	5.11	36.83	41.95	48.4
化石砂鉍	0.50	3.68	4.18	4.8
珪長質火山岩類-花崗岩類	0.43	1.18	1.62	1.9
その他	2.16	0.00	2.16	2.5
合計	30.96	55.62	86.59	100.0

が重要である。

金鉍床は第2表で示すように、これまでに約31トンの生産量が記録されており、推定鉍量を含めて総金属量は約87トンである。金鉍床の生成年代はPbモデル年代では32.2億年である。母岩としては超苦鉄質-苦鉄質火山岩類とタービダイトが重要である。母岩の変質は石英-絹雲母、石英-フクサイト、滑石-炭酸塩鉍物の組み合わせが一般的である。

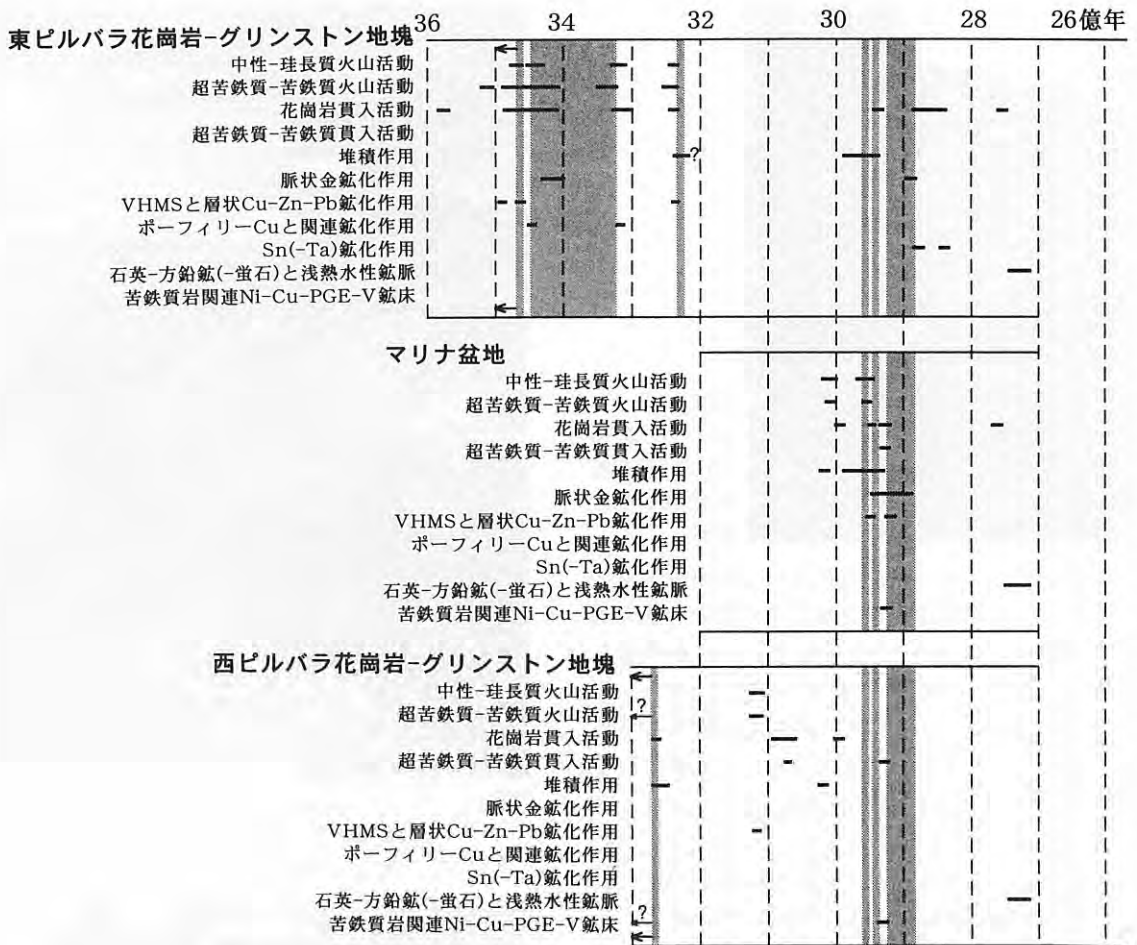
第12図 ピルバラ地塊の時代別の鉱化作用一覧表 (Huston *et al.*, 2001).

写真32 シャウ岩体変形後の細粒花崗岩-ペグマタイト岩脈。周縁部がペグマタイト性。

火山性塊状硫化物鉱床で最大のものはサルファースプリング鉱床である。総計5万mの試錐によつ

て、次の鉱量が得られている。

サルファースプリング鉱床：亜鉛鉱量 280万トン (Zn 10.7%, Cu 0.6%), 銅鉱量 250万トン (Zn 1.1%, Cu 4.0%)。

この鉱床はサルファースプリング層群(32.4-32.5億年)の厚さ200mのデイサイトシル、および一部はその直上のチャート(マーカー)中に胚胎するもので、上盤側の流紋デイサイトには存在しない。鉱物の垂直ゾーニングがあり、Znは上部の鍵層中に、Cuはデイサイト中に多い。硫化物は黄鉄鉱、鉄に乏しい閃亜鉛鉱、黄銅鉱、方鉛鉱などである。

火山性塊状硫化物鉱床には層状重晶石鉱床も含まれており(第13図)、この時期から硫酸塩鉱床が出現しており、局部的には酸化環境があったことが明らかである。母岩のPb同位体モデル年代、ジルコンのU-Pb年代によると、これらの同生鉱床は



写真33
ワイマン累層
中の柱状節理
が発達する流
紋岩。

34.9億年(ドレッサー重晶石鉱床)と34.70億年を示す。ダッファー累層中の珪長質岩を母岩とする火山岩性塊状硫化物鉱床はPbと重晶石に富む特異な性格を持つ。Pbは放射改変によりU, Thなどからも生じるために、一般に若い顕生代の鉱床に多い特徴がある。33.1-33.3億年のワイマン累層の流紋岩(写真33)は鉱化作用に乏しい。

酸化型火成鉱床の代表であるポーフィリー型のCu-Mo鉱床は2カ所で発見されており、最古のミラガクリーク鉱徴地は34.5億年の珪長質岩株中に黄銅鉱-黄鉄鉱ストックワーク、これに重複する閃亜鉛鉱-方鉛鉱-黄鉄鉱脈が走るものである。より重要なコピンスギャップCu-Mo鉱床は33.2億年の珪長質岩株中に産出する(写真37)。南方2kmの花崗閃緑岩(33.1億年)は、筆者の現地調査では中間系列の帯磁率($1.9 \sim 2.5 \times 10^{-3}$ SI)の値を示した。この鉱床は1.02億トン(Mo 0.105%, Cu 0.152%), 金属量にしてMo 10.4万トンおよびCu 15.5万トンであり、未開発のMo資源としては世界最大級クラスといわれている(Huston et al., 2001)。母岩はユーロ玄武岩に属する高Mg枕状玄武岩、破碎化蛇紋岩、滑石-緑泥石片岩などに貫入した変成・変質(主に珪化)斑状デイサイトと流紋デイサイト貫入岩体であり、石英-炭酸塩鉱物細脈がストックワーク状に走る。硫化物は2%以下、黄銅鉱・輝水鉛鉱・磁硫鉄鉱・灰重石、まれに閃亜鉛鉱が含まれる。

還元型鉱物資源の代表であるSn鉱床として、ウオッジナ(Wodgina)およびマウント キャシテライト

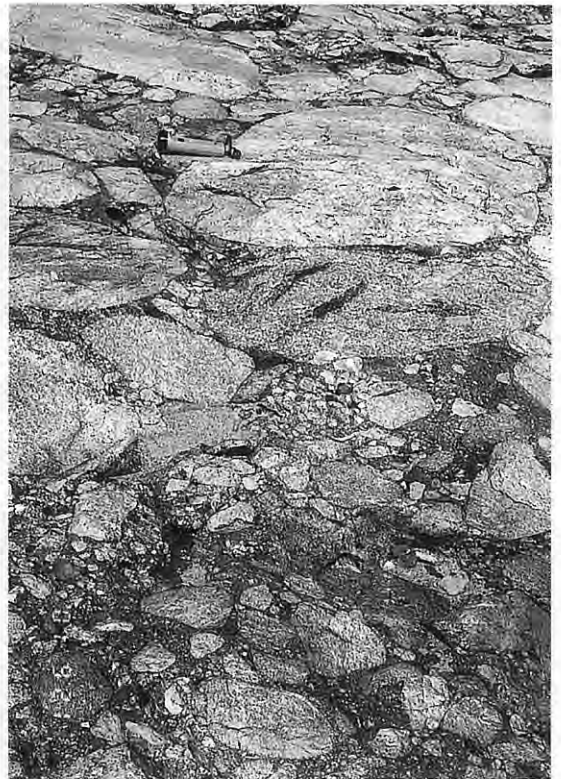


写真34 ブラックレンジドレライト岩脈(27.72億年)の北端に見られる“礫岩状”角礫岩-1. 大きい礫ほど円礫化。水蒸気爆発によるもの。



写真35 “礫岩状”角礫岩-2. 礫は基盤の花崗岩質片麻岩、マトリックスは黒砂。

Ta-Sn鉱床がある。これは変コマチアイト-玄武岩、緑色片岩・砂質泥質片岩に貫入するアルバイト・ベグマタイト岩脈群に伴うもので、これまでに下記の生産量がある。

ウオッジナ：1905-1940年 Ta精鉱 39.3トン；
1988-1994年 Ta 269トン、



写真36 コンテルナ層群中の珪化帯。珪質なため小高く残留する。



写真37 コッピン ギャップ Mo-Cu 鉱微地のデイスイト中の石英鉱脈(白)。

マウント キャシテライト：1904-1918年 Sn 精鉱 193トン；～1998年 Ta 308トン。

マウント キャシテライトでは推定を含めて下記の鉱量がなお残存している。

鉱量：3,500万トン。品位：Ta₂O₃ 402g/t, SnO₂ 251g/t, Nb₂O₃ 50g/t。これには酸化物としてTa₂O₃ 14,070トン, SnO₂ 8,785トンが含まれる。

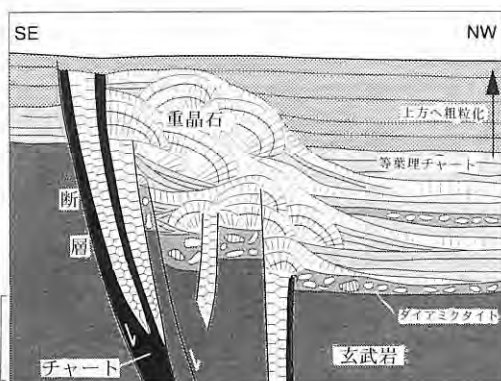
鉱石鉱物はペグマタイト中に鉱染状を呈して産出し、Mn タンタル石、Mn コロンブ石、ウオッジナイト((MnFe²⁺) (SnTaTiFe³⁺) (TaNb)₂O₈)、錫石などからなる。

縞状鉄鉱層としては、シャイ ギャップ、ミニンガラ、マウント ゴールドワーシヤリーなどが32.4～30.2億年のゴルジ クリーク層群に胚胎している。前2鉱床の鉱石はジャスピライトと縞状鉄鉱層が二次富化作用を受けて稼行品位に達したものである。ミニンガラ鉄鉱層のサンライズ鉱山のピット(写真18)からはこれまでに約500万トン(Fe55%)の鉱石が生産された。ビルバラ地塊南方のハマスレイ盆地(27.0-24.5億年)には、世界的に最大規模の鉄鉱層鉱床がある。

重晶石鉱床としての生産量はドレッサー鉱産地帯からの1970-1990年間12.9万トンがある。これは変質枕状玄武岩を切る岩脈中に脈状、その周辺にマウンド状に産出するものであり、カルデラ壁に沿った循環熱水作用によって生成した(第13図)。

7. むすびービルバラ地塊の酸化/還元状態

酸化型鉱物の代表例は硫酸塩鉱物(-SO₄)・磁鉄



第13図 ドレッサー累層中の重晶石鉱床生成の模式断面図(Van Kranendonk et al., 2001)。

鉱(Fe₂O₃FeO)・赤鉄鉱(Fe₂O₃)であるが、縞状鉄鉱層の赤鉄鉱は新生代の二次富化作用でも生じるので、前2者について考察すると、ビルバラ地塊の最初の重晶石は34.9～34.7億年頃層状硫化物鉱床に産出している。したがってこの時代の海洋底に酸化環境が存在したことは明らかである。恐らく地球上最初のシアノバクテリアの光合成活動によって局部的に酸素が発生し、浅海の表層を酸化し、裂か沿いの熱水循環活動によって重晶石を沈殿せしめたものと思われる。

より大きな酸化盆地を表すものとして縞状鉄鉱層がある。その最も古いものは33.1-32.3億年のワイマン層に出現する。更に大規模で、かつ稼行されたものは32.4～億年のゴルジクリーク累層に発達する。これら堆積性鉄鉱床も割れ目に沿った熱水循環で下位のコマチアイト～玄武岩のFeOが溶脱・酸化して沈殿したものと思われるから、局部的

な酸化盆地が存在したことは明らかである。

一方、これら鉱床より2桁は規模が大きい花崗岩岩体については、一般に低い帯磁率から、その大部分がチタン鉄鉱系か中間系列に属することが明らかとなった。したがってピルバラ地塊の表成物質には一部で酸化鉱物が含まれるが、その当時の大陸地殻は大量の還元的花崗岩類で占められていると言える。酸化型の花崗岩類は南アのバーバートン地域(約31億年前)と同様に、より若い花崗岩類で現れる可能性が大きく、次回には南方のイルガン地塊の花崗岩類を検討してみたい。

文 献

- Bickle, M. J., Bettenay, L. F., Barley, M. E., Chapman, H. J., Groves, D. I., Campbell, I. H. and de Laeter, J. R. (1983) : A 3500 Ma plutonic and volcanic calc-alkaline province in the Archean East Pilbara Block. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v.84, 25-35.
- Blewett, R. S. *et al.* (2000) : Atlas of north Pilbara. *Geology and Geophysics*. Geoscience Australia.
- Collins, W. J. (1989) : Polydiapirism of the Archean Moirnt Edgar Batholith, Pilbara Block, Western Australia. *Precambrian Res.*, v.43, 41-62.
- Geological Survey of Western Australia (1990) : *Geology and Mineral Resources of Western Australia*. Geol. Surv. W. Australia, Mem. 3, 827p.
- Glover, J. E. and Ho, S. E. edited (1992) : The Archean: Terrains, processes and metallogeny. *Proc. 3rd Intern. Archean Sym.* 1990, Univ. West. Australia, Pub. no. 22, 436p.
- Gruau, G., Jahn, B. M., Glikson, A. Y., Davy, R., Hickman, A. H. and Chauvel, C. (1987) : Age of the Archean Talga-Talga subgroup, Pilbara Block, Western Australia, and early evolution of the mantle: new Sm-Nd isotopic evidence. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 85, 105-116.
- Hamilton, P. J., Evensen, N. M., O'Nions, R. K., Plikson, A. Y. and Hickmen, A.H. (1981) : Sm-Nd dating of the North Star basalt, Warrawoona Group, Pilbara Block, Western Australia. *Geol. Soc. Australia, Spec. Pub.* 7, 187-192.
- Ho, S. E., Glover, J. E., Myers, J. S. and Muhling, J. R. edited (1990) : *Third International Archean Symposium, 1990. Excursion Guide*. Univ. West. Australia, Pub. no. 21, 397p.
- Holland, H. D. (1999) : When did the Earth's atmosphere become oxidic? A reply. *The Geochem. News*, no.100, 20-22.
- Huston, D. L., Blewett, R. S., Sweetapple, M., Brauhart, C., Cornelius, H. and Collins, P. L. F. (2001) : Metallogensis of the north Pilbara granite-greenstones, Western Australia. *A field guide*. W. Australia Geol. Surv., Record 2001/11, 87p.
- Nelson, D. R. (1999) : Compilation of geochronology data, 1998. *West. Australia Geol. Surv.*, Record 1999/2, 222p.
- Ishihara, S. (1977) : The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geol.*, 27, 293-305.
- 石原舜三 (2003) : 資源環境地質学: I-A3 ベグマタイト鉱床. 資源地質学会. 17-22.
- Ishihara, S., Robb, L. J., Anhaeusser, C. R. and Imai, A. (2002) : Granitoid series in terms of magnetic susceptibility: A case study from the Barberton region, South Africa. *Gondwana Res.* V.5, 581-589.
- Ohmoto, H. (1997) : When did the Earth's atmosphere become oxidic? *The Geochem. News*, no. 93, 12-13, 26-27.
- 酒井 均 (1999) : 地球と生命の起源. 講談社, 305p.
- Solomon, M. and Groves, D. I. (1994) : The geology and origins of Australia's mineral deposits. *Oxford Monogr. Geol. Geophys.*, no.28, 951p.
- 高島 清 (1972) : オーストラリアのプレカンブリアンと鉱物資源の分布. *地質ニュース*, no.214, 52-65.
- Thorpe, R. L., Hickman, A. H., Davis, D. W., Mortensen, J. K. and Trendall, A. F. (1992) : U-Pb zircon geochronology of Archean felsic unites in the Marble Bar region, Pilbara Craton, Western Australia. *Precambrian Res.*, 56, 169-189.
- Van Kranendonk, M. J., Hickman, A. H., Williams, I. R. and Nijman, W. (2001) : Archean geology of the East Pilbara granite-greenstone terrane, Western Australia-A field guide. *Dept. Miner. Petroleum Res.*, 134p.
- 渡辺 海・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.
- 渡辺由美子 (1998) : 大気はいつ酸化的になったか?-大本-Holland 論争について-. *地質ニュース*, no.526, 45-56.

ISHIHARA Shunso (2003) : Granitoids and metallic deposits in the Pilbara Craton, Western Australia, with special reference to their oxidation and reduction status.

< 受付 : 2003年3月3日 >