

マウントブルース超層群 西オーストラリア, ピルバラクラトン上に残る 太古代・原生代境界の地球変動の記録

清川 昌 一¹⁾

1. はじめに

近年の詳細な地質調査, 年代測定法/化学分析法などの技術革新により, 太古代後期27-25億年前にかけて地球史上最大の表層環境転換期であり, また大陸の形成やテクトニクスが大きく変化したことが, 明らかになってきた(eg. Holland, 1984; Windley, 1995; 丸山, 1995; 平・清川, 1998). この時期, 地球は世界的規模での火成活動が起こり, 初期超大陸の形成・分裂が活発化している. 例えば, カナダ・スベリオール/スレーブ地域や西オーストラリアのイルガールン地域では大量の島弧が順に衝突/付加を起こして大陸を形成した(eg. Hoffman, 1988; Krapez, 1993). 南アフリカのカプバルや西オーストラリアのピルバラ地域ではすでに形成されている大陸上に大量の洪水玄武岩が噴出し, 大陸分裂が起こっている(eg. De Wit and Ashwal, 1997; Nelson *et al.*, 1999). 南極大陸でも27-26億年前に広域に渡る高温変成作用が起こっている(eg. Harley and Black, 1997). またこの時期, 汎地球規模で海水準変動が起こり, 表層環境も太古代後期から原生代初期にかかわると急激に酸化になったことが, 世界各地に分布する大規模縞状鉄鉱層, 赤色堆積岩の出現や堆積性ウラニライトの消滅などから明らかになっている(Windley, 1995; Eriksson *et al.*, 1999). 生物界が光合成によって光エネルギーを効率良く使えるようになったのもこの時代からである(Holland, 1984; Kasting and Ackerman, 1986).

今回は, 地球規模の大変化のあった後期太古代から初期原生代(28-23億年前)の記録を残す西オーストラリア北西部, ピルバラ地域にあるマウントブ

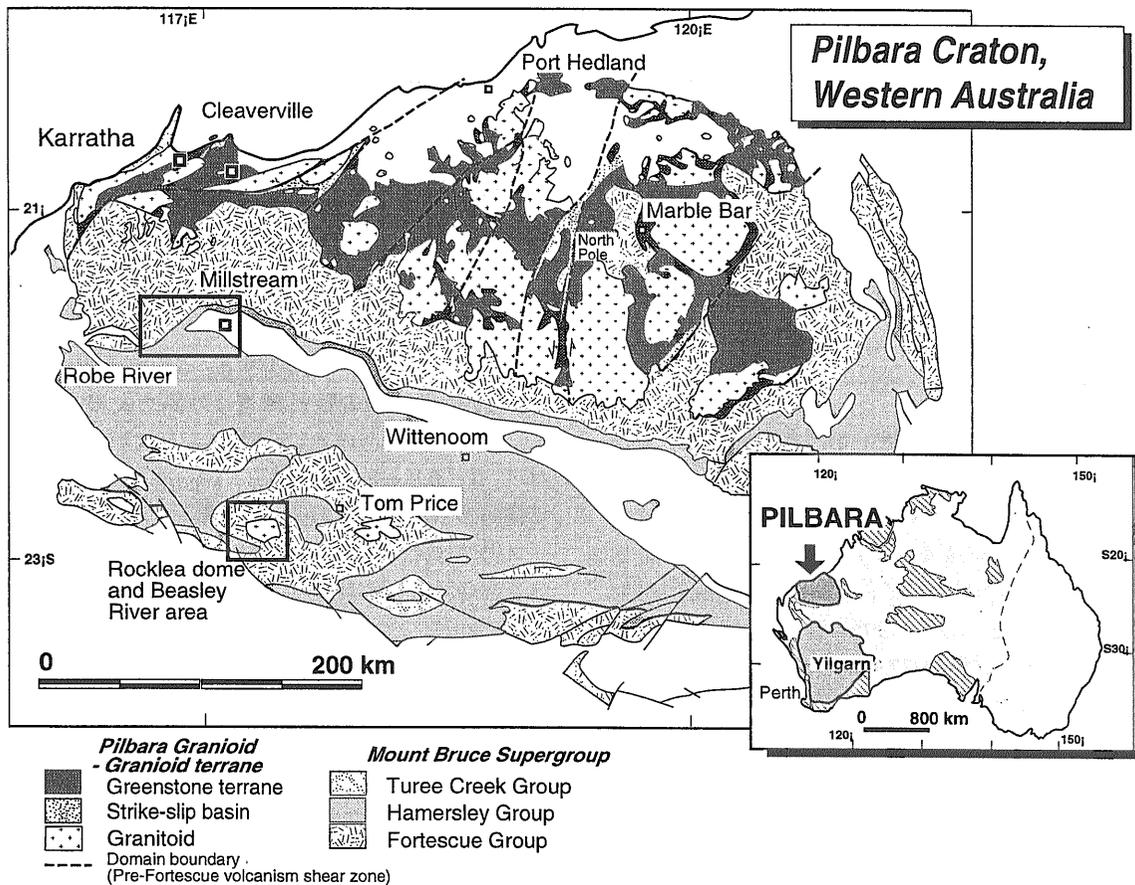
ルース超層群について報告する. ここでは特に, 筆者が1990年以降の野外調査より得た成果をふまえ, 連続10,000mの連続層群がみられる南部ピルバラ, ロッカリードーム地域と, 70km以上にわたって側方変化が追跡できる北西部ミリストリーム・ロープ川地域から, 当時の表層環境/火成活動の記録を読み取り, 地球史上における最初のターニングポイントについて述べていく.

2. マウントブルース超層群

マウントブルース超層群(Mount Bruce Supergroup)はピルバラクラトン上に整然と堆積した火山岩・堆積岩からなる地質帯で, 東西400km, 南北200kmに広がり, 総面積は50,000km²以上におよぶ(第1図・ほぼ四国と中国地方を合わせた大きさ). 本地層群は全層厚が約10,000mで, 下位より大陸洪水玄武岩(continental flood basalt)を主とし陸上から浅海相からなるフォーテスキュー層群(Fortescue Group), 縞状鉄鉱層を主とするハマスレー層群(Hamersley Group), 浅海性堆積岩からなるチューリーククリーク層群(Turee Creek Group)の3つの地層群からなる(第2図; Trendall and Blockley, 1970). また, 最近ではシークエンス層序学の観点からこれらを2つにまとめ, チッチェスター山地メガシークエンス(Chichester Range megasequence)とハマスレー山地メガシークエンス(Hamersley Range megasequence)に区分している(Black, 1993; Barley *et al.*, 1997). 堆積場の見地からハマスレー層群をハマスレー・ベースン(Hamersley Basin), チューリーククリーク層より上位をマックグラス・トラフ(McGrath Trough)とも呼

1) 国立科学博物館:
〒167-0012 東京都新宿区百人町 3-23-1

キーワード: 洪水玄武岩, 縞状鉄鉱層, 赤色岩, 黒色頁岩, シアロ
バクテリア, 海水準変動



第1図 ピルバラ地域の地質図。

ばれている (Trendall and Blockley, 1970; Martin et al., 2000)。

マウントブルース超層群は南北での分布・変形が異なる。北部ピルバラではほとんど変形・変成がなく緩く南傾斜し、35-29億年前のグリーンストーン・花崗岩帯からなるピルバラクラトン上に不整合で重なる。南部ピルバラでは19億年前に起こったイルガルクラトンとの衝突で基盤を巻き込んだ褶曲帯になり、ドーム・ベースン構造を作っている。褶曲構造軸部には世界最大の鉄鉱山が点在する。北部ピルバラ地域では傾斜が緩く、保存の良い同じ地層が数百kmにわたって追跡でき側方変化の観察に適している。一方、連続した層序の上下関係は褶曲した南部地域の方が調査しやすい。

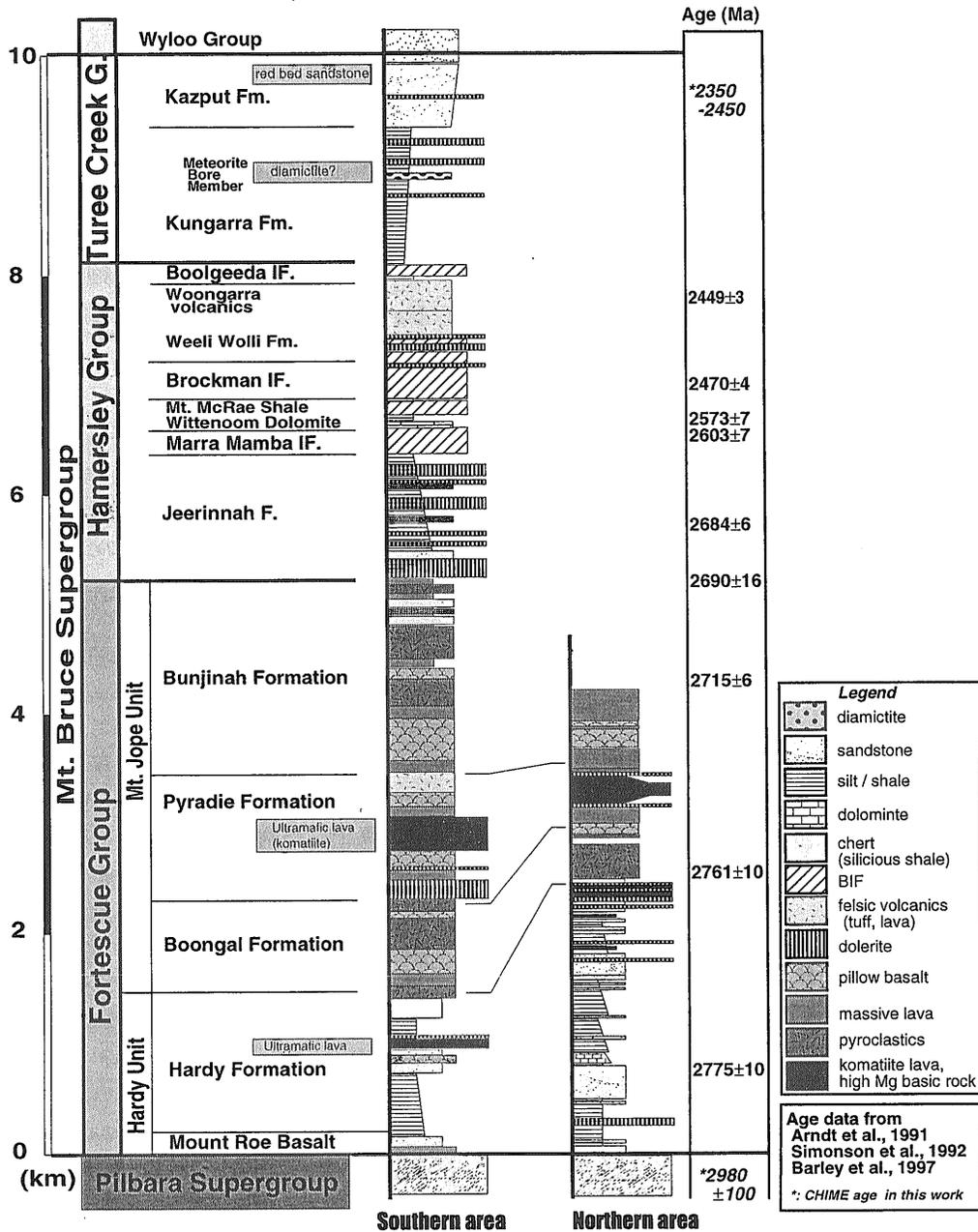
ここでは、北部の代表としてミリストリーム・ローブ川地域 (Millstream / Robe River areas)、南部の代表としてロックリードーム地域 (Rocklea dome

area) のベースリー川流域 (Beasley River) を選んだ。ベースリー川流域では、褶曲に伴うドーム構造を形成し、中心にある基盤花崗岩類からその周りのマウントブルース超層群の連続した地層が川沿いに露出している。この川を南北に縦断することで、マウントブルース超層群の全体的な変化を見ることができる。また、北部ミリストリーム・ローブ川地域では、一般に風化により見えにくい地層が、フォーテスキュー川やローブ川沿いに連続的に露出し、その側方変化を追跡できるためである。以下、ベースリー川沿いで作成した10,000mの連続柱状図を軸に、他の地域と比較しながらマウントブルース超層群の約5億年間の堆積・火成岩活動の記録を追っていく(第2図)。

A : フォーテスキュー層群

フォーテスキュー層群は模式層厚5,000mといわ

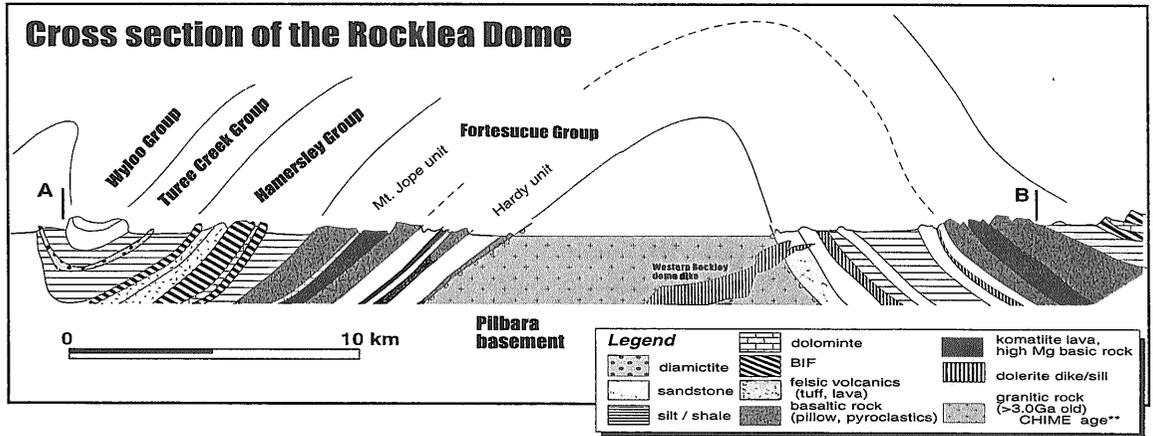
Columnar sections of the Mt. Bruce Supergroup at Rocklea dome, Southern Pilbara



第2図 ロックリードーム地域のマウントブルース超層群総合柱状図。

れ、広域に分布する洪水玄武岩、その間に挟まれた河川、湖、浅海堆積物からなり、各地で基盤との不整合が確認されている (Hickman, 1983; Black, 1993)。岩相変化が著しく、ピルバラクラトン北部で

は陸源から浅海堆積相、南部は枕状溶岩を主とし浅海から比較的深い堆積相に移り変わる。酸性凝灰岩中のジルコン・ウラン鉛年代から、これらの地層は27.7-26.9億年前に形成されたといわれてい



第3図 ベースリー川沿いロッカリードーム地域の地質断面図。

る(Arndt et al., 1991)。

ロッカリードーム地域では、ドームの南北両側に分布するフォーテスキュー層群は特異な岩相と航空写真から地層対比は可能であるが、層厚はかなり異なる(第2図)。地層は砂岩層を主体とするハーディーユニット(Hardy unit)、火山岩類からなるマウントジョープユニット(Mt. Jope unit)の2つの層準に区分でき、それぞれに超塩基性岩石やドレライト層を挟んでいる。これらの地層群は角閃岩相の変成作用をうけているが、当時の火山岩・堆積岩組織はきちんと保存されており、埋没に伴う変成作用であると考えられる(Smith et al., 1982)。以下、ロッカリードーム地域での具体的な地層の特色を述べる。

1) 基盤岩と不整合・岩脈

ロッカリードーム中心部に位置する基盤岩類は29.8億年前(CHIME年代, 未公表)を示す花崗岩類と片麻岩化したグリーンストーン・花崗岩帯からなる。航空写真によると、均質な花崗岩は南部に分布し、褶曲した片麻岩からなるグリーンストーン帯は北部にその構造・組織が確認できる(口絵A-6)。この大陸地殻を形成する基盤岩類上にマウントブルース超層群の堆積・噴出した証拠が残っている。1つは基底礫岩を持つ不整合の存在、2つ目は大陸地殻を割り上部の火成岩を供給したフィーダー岩脈の存在である。

不整合は、南東部や南西部などの比較的構造の穏やかな部分で、洪水玄武岩や基底礫岩が基盤岩

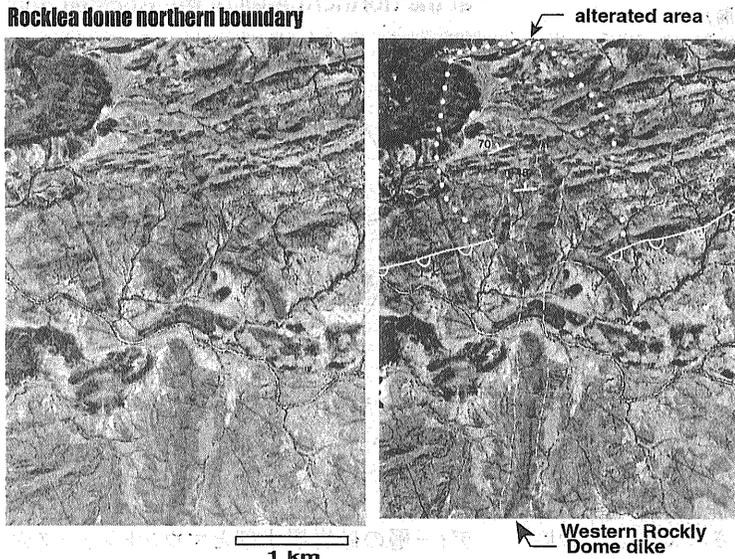
上に重なる。しかし、東西の褶曲軸で東西に緩くプランジしたドーム構造をもつため(第3図)、軸に平行の部分では褶曲に伴う層内剪断(フレキシュラスリップ剪断)により、特に南北の地層境界は変形し、面構造の発達した珪質頁岩(チャート)が多くなる。

フィーダー岩脈の存在は航空写真により確認される(口絵A-6)。植生の少ないピルバラ地域には7種類の主要岩脈群が貫入しているといわれている(Tyler, 1990)。最近の年代測定の結果、東部ピルバラクラトンにあるブラックレンジ岩脈(ショーパソリスを北北東走向に貫いており、その長さは延長100km、幅1kmにおよぶ。)はフォーテスキュー火山岩を供給したフィーダー岩脈の可能性が指摘されているが、具体的な貫入場は報告されていない。

ロッカリードームでは少なくとも2種類の岩脈が認められる(口絵A-6)。一つは直線的な北西方向の岩脈群で、ほとんど変成していない非常に新鮮なドレライト、ガプロ組織を残している。これは、すべての地層・構造を切っていることよりドーム形成後の原生代中期以降のものと考えられる。もう一つはロッカリードーム西部にある南北性でやや幅が広い岩脈である。これは、前述の岩脈群に貫かれていた古い岩脈で、ここでは「西ロッカリードーム岩脈: West Rocklea Dome dike」とよぶ(口絵A-7)。

西ロッカリードーム岩脈は今までは、基盤岩のみに貫入した古い岩脈で、フォーテスキュー層群に不整合で覆われていると思われていた(Blight, 1985)。しかし、詳しい調査で、この岩脈は基盤の

Feeder dike of the Fortescue Volcanics Rocklea dome northern boundary



第4図
西ロッカリドーム岩脈
(West Rocklea Dome dike)
とマウントブルース超層群
最下部不整合のステレオ
航空写真。

花崗岩類から不整合面を貫いてハーディー層の途中まで追跡でき、周囲数百mの範囲にその影響を及ぼしていることがわかった。岩脈はサブオフィテック組織をもつドレイトからなり、フォーテスキュー層群に貫入しているドレイトシルと同じ岩相を示す。また周りと同様に角閃岩相の変成作用、褶曲に伴うクリベージ形成などの変形を被っている。不整合面は断層より東側は数百m南へずれており、この食い違いは貫入が伸張場で起こり、正断層で断層より東側が落ちていることを意味する。また、この地域は熱水変質により堆積物が粘土鉱物化して侵食されているために、地形が平坦になっており、側方からのハーディー層の連続性が失われている。(第4図、口絵A-8)。変質粘土層には熱水性と思われる酸化鉄の脈群が300m四方に分布しており(口絵A-8, 9)、岩脈貫入の際の熱水活動の影響によると考えられる。現地では広い平坦地は部分的に掘り返された古い鉱山跡の面影が残る。この地域では熱水起源の二次的銅鉱山や超塩基性岩の貫入にともなうアスベスト鉱山があったらしい(Blight, 1985)。

このように、30億年前のグリーンストーン花崗岩帯(基盤岩)との不整合関係や、火山岩の供給路となるフィーダー岩脈の存在により、明らかにフォーテスキュー層群は大陸地殻上に形成された地質帯であることがわかる。

2) ハーディーユニット

(マウントロー玄武岩・ハーディー層)

フォーテスキュー層群は、ロッカリドーム南東部から南部で薄い陸源性玄武岩溶岩のマウントロー玄武岩(Mt. Roe Basalt)から、北部では、厚い砂岩層からなるハーディー層(Hardy Formation)からはじまる本地域のマウントロー玄武岩はピルバラクラトン上に不整合で重なり、発泡痕の多い陸源性の洪水玄武岩である。このことは北部ピルバラと同様にこの地域が陸上であったことを意味する。

ハーディー層は、ロッカリドーム北側が特に厚く模式地になっており、そこを横切るハーディー川が名前の由来である。ハーディー層は淘汰のよい礫岩層、クォーツアイト砂岩、頁岩層からなる。基底礫岩になっている局所的なチャンネル状の礫岩層や、東から西の古流向を示す2m-50cmの波高のトラフ型斜層理やタビュラー型斜交層理が発達する砂岩層(口絵A-5)、氾濫源堆積物である厚い泥岩層より、この時期網状河川から浅海に移り変わる大規模デルタを形成していたと考えられる。斜交層理から当時の古流向は東から西であり(第5図)、今まで報告されているハーディー層の方向と一致する(Blight, 1985; Black, 1993)。また地域的に薄い玄武岩溶岩やサブオフィテック組織を残すドレイトシルが砂岩層に貫入している。

3) マウントジョープユニット

(枕状溶岩・パイロクラステック層)

南部ピルバラ地域では、このハーディーユニット上には枕状溶岩とパイロクラステック層の繰り返す厚い火山岩類が重なる(口絵A-1)。これはマウントジョープ火山岩(Mt. Jope volcanics)と呼ばれており、その層厚は全体で約3,000mになる(De la Hunty, 1965; Trendall, 1990)。下位から、厚い枕状溶岩からなるブーンガル層(Boongal Formation)、厚い火山角礫岩からなるピラディー層(Pyradie Formation)、最上部の厚い枕状溶岩・パイロクラステック層のブンジナ層(Bunjinah Formation)とよばれており、これらはそれぞれ北部ピルバラ地域のキレーナ玄武岩(Kylena Basalt)、タンビアーナ層(Tambiana Formation)、マッデナ玄武岩(Maddina Basalt)と対比されている(Hickman, 1983; Blight, 1985)。

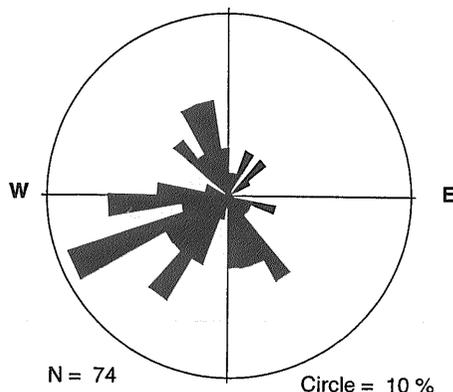
枕状溶岩は層厚30m以上あり、枕状組織は直径1-3mの大きいものが多く、発泡痕は比較的少ない(口絵A-1)。また、内部にオセリー(Ocelli)構造とよばれる直径1-10cmの丸い組織(仏像の頭のような表面になる)が発達する。この組織は石英成分が若干基質より高いため薄い色を帯び、また風化に耐えることによりきわだって残っている。これらは特に太古代の深海性塩基性・超塩基性溶岩に多い構造といわれており、その成因は液体不混和(liquid immiscibility)、不均質核形成の急激な成長、脱ガラス作用(devitrification)、メタソマティズム、マグマミキシング、固相分離(exsolution paragenesis)、海水との反応などが考えられているが結論は出ていない(Sylvester *et al.*, 1997)。

パイロクラステック層は層厚300m以上あり、枕状溶岩の破片を含む角礫岩やハイアロクラスタイトからなり、当時の水中での爆発的火山活動が活発であったことがわかる(口絵A-4)。これら火山岩層の上位には堆積組織をもつ凝灰岩層があり、級化層理や脱ガスパイプなどの構造が残る。火山岩類は基本的にはソレアイト質の玄武岩類で(Trendall, 1990)、そのほかにも数十mの厚さで柱状節理をもつデイサイト層などが挟まれる。

4) コマチアイト溶岩

コマチアイト溶岩(もしくは高Mg玄武岩)はハー

Paleocurrent direction of the Hardy Formation at the northern area of the Rocklea dome



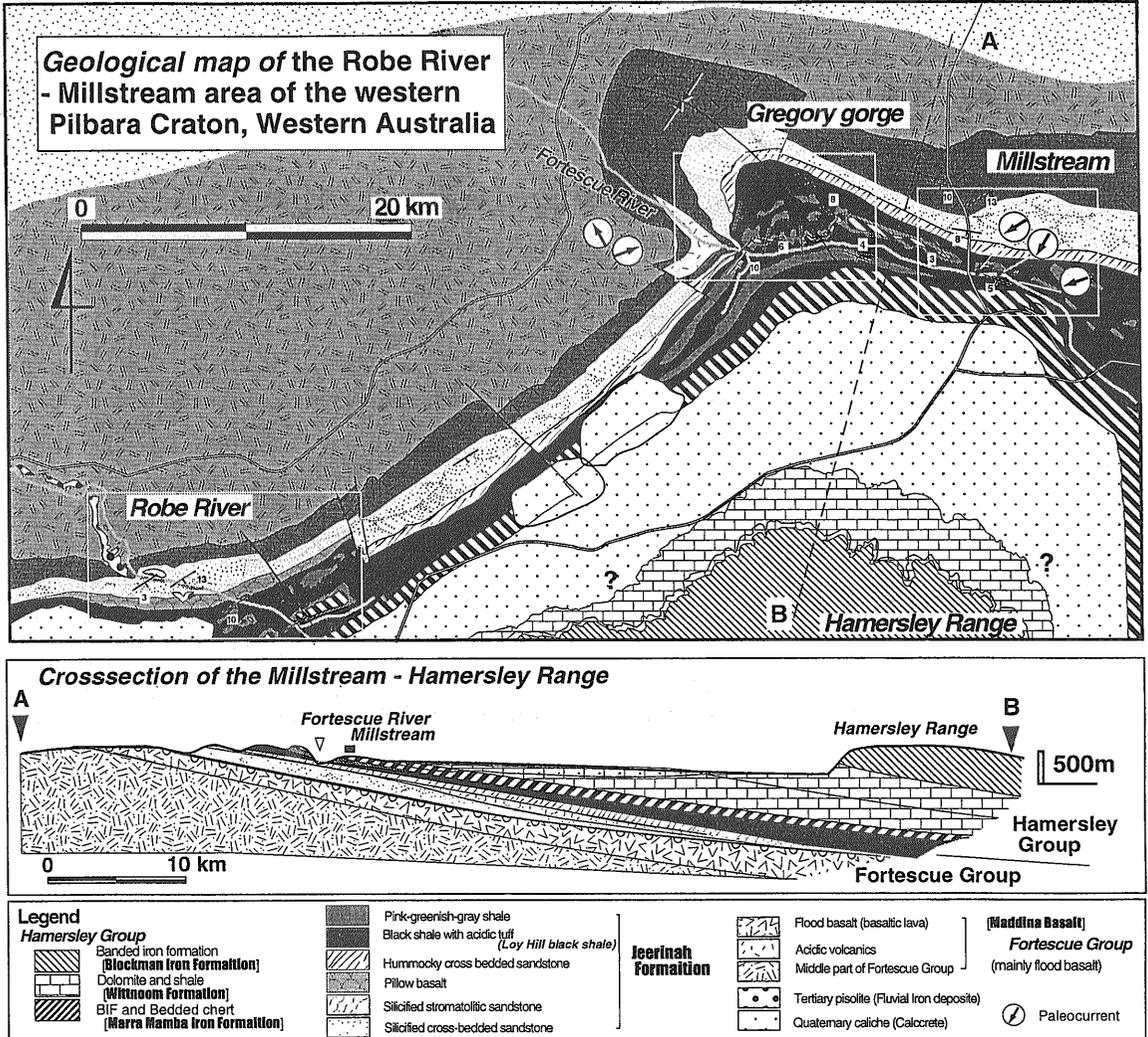
第5図 ハーディー層に残る砂岩層の古流行(北ロッカリードーム地域)。

ディー層の砂岩層上部とマウントジョープ火山岩中部に出現する。直接堆積岩に接するところもあるが、オフィテック組織をもつドレライトが上下に分布する場合が多い。ハーディー層中には1層の厚さ20mのコマチアイト溶岩層が重なり露出する(口絵A-2)。その表面は骸骨状をした急冷ジョイントが特徴的に残り、粘性が高かったと考えられる。また、スピニフェックス構造、卵大のオセリー(Ocelli)構造(口絵A-3)、ガス抜けパイプなどの組織が残っているが、蛇紋岩化している。これらコマチアイトは高温の超塩基性火山活動でできる岩石で、太古代後期におけるスーパーブルームの活動を暗示している。

B: ハマスレー層群

ハマスレー層群は厚い縞状鉄鉱層で特徴づけられる。そのため、Trendall and Blockley (1970)では縞状鉄鉱層の始まりと終わりをもってハマスレー層群を定義した。しかし、Kriewaldt (1963)では洪水玄武岩から急激に上方細粒化する堆積岩に変化するジェリーナ層(Jerrinah Formation)の始まりに大きな意味があると考えていた。近年の層序分類は、ジェリーナ層の不整合からハマスレー山脈メガシークエンスと呼んでおり(Barley *et al.*, 1997)、ここではジェリーナ層をハマスレー層群の最下部としてすすめる。

ハマスレー層群はフォーテスキュー洪水玄武岩上に不整合で浅海性砂岩層、厚い黒色頁岩層、化学



第6図 ミリストリーム地域の地質図。

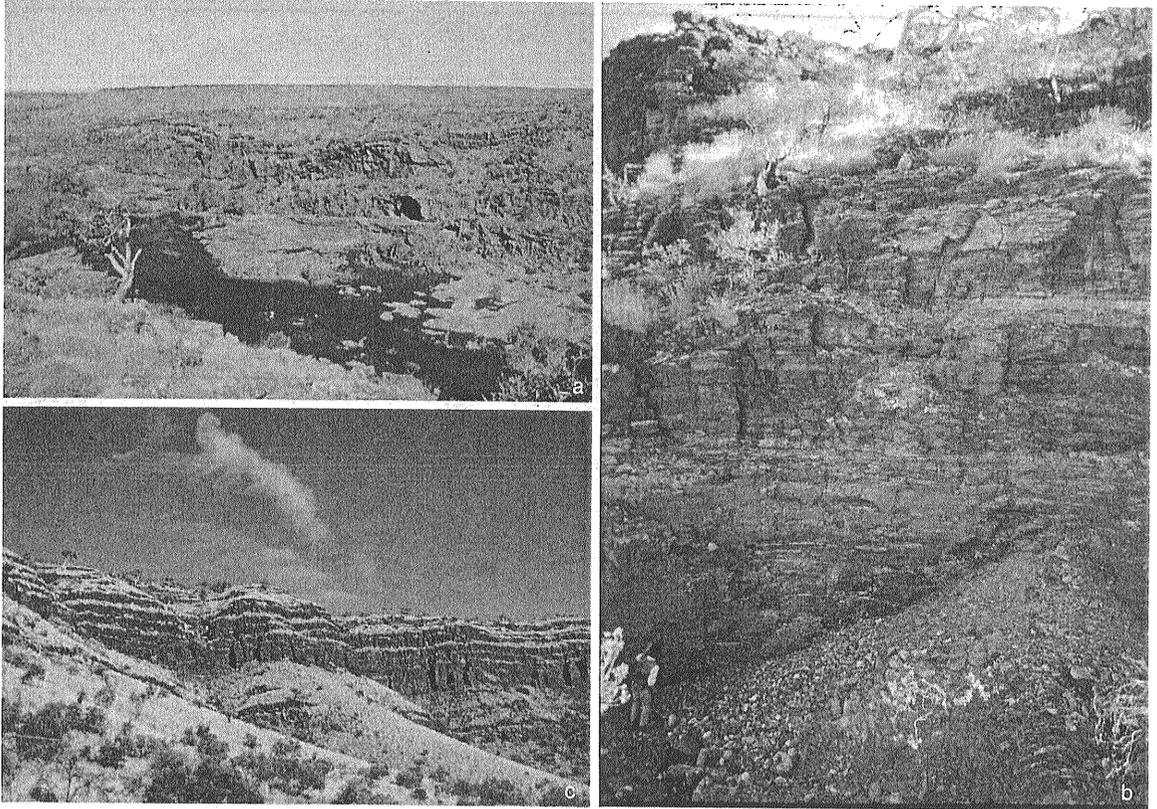
沈澱物からなるジェリーナ層からはじまり、3回の厚い縞状鉄鉱層の出現で特徴づけられる。また、鉄鉱層間には浅海性ドロマイト層や火山灰層、流紋岩・デイサイトを挟むが、大陸起源の堆積物はほとんどないため「遠洋性」環境で堆積したと考えられる。層厚は2,000mで、それぞれの層厚は非常に広範囲で対比できる。ハマスレー層群の堆積年代は酸性凝灰岩、酸性火山岩のウラン鉛年代より2650Maから2450Maである。

1) ジェリーナ層群

フォーテスキュー層群とハマスレー層群の関係を示すジェリーナ層は、ロッカリードーム地域では変質

した白、赤紫色の頁岩層が露出するが、何回ものドレライトシルに貫入されており、当時の熱水活動や後の風化により地層の連続的な変化についてはよくわからない。ここでは露頭条件の良い北部ピルバラのミリストリーム・ローブ川地域を例に、砂岩・頁岩層から縞状鉄鉱層に移り変わるかを述べる。

北部ハマスレー地域のミリストリーム・ローブ川地域(第6図)では、古土壌(paleosol)をもつ玄武岩溶岩上に不整合(第7図-a)でジェリーナ層が重なり、下位より、トラフ・タビュラー型斜交層理砂岩、ストロマトライト層を含む砂岩層、ハンモッキー斜交層理砂岩層、黒色頁岩層からなる。黒色頁岩層は上位にむかってピンク色頁岩になり、その上位にマ



第7図 北部ピルバラの写真。

- a. 不整合 洪水玄武岩 (Maddina basalt) とジェリーナ層 (Jeerinnah) 最下部の砂岩層。厚い玄武岩溶岩層上に不整合で層状に見える砂岩層が重なる。上部は頁岩層。崖の高さは約50m。
- b. 最上部ジェリーナ層のロイヒル黒色頁岩 (Roy Hill black shale) とピンク色頁岩。最上部にチャート層・マラマンバ縞状鉄鉱層が重なる。
- c. ウィットヌードロマイト(下位)とブロックマン縞状鉄鉱層(上位)の遠景。フォーテスキュー川沿いには数100kmにわたって連続性のよい崖が続く。

ウントブルース超層群における最初の縞状鉄鉱層 (マラマンバ鉄鉱層) が重なる (第7図-b)。北東-南西方向の側方調査によると、ジェリーナ層はそれぞれ上方細粒化の海進層序を持ち、東から西南方向に向かって砂岩層が薄く、逆に頁岩層が厚くなっている。古流向も東から西方向を示すことより、西南地域ほど早くから海が深くなり、南西から北東方向に海進が進んでいったことがわかる。

ジェリーナ層で強調されるのは非常に厚く真っ黒な黒色頁岩である。これはロイヒル黒色頁岩とよばれ、層厚50m以上あり、非常に炭素濃度が高く、平均5-10%/wtで、中には16wt%に達するものもある (Trendall and Blockley, 1970; 清川・池原, 1999)。まさしく「炭」の層である。この地層は炭素

同位体比は著しく低く-40~60%を示す (清川・池原, 1999; Kakegawa *et al.*, 2000)。この時期は世界各地でも著しく低い炭素同位体比を持つ黒色頁岩が報告されており、嫌気性の海底はメタン菌などの活動が活発化した可能性がある。また硫黄同位体比が低いことより、海底には硫酸還元菌の活動が活発であったと考えられている (Kakegawa *et al.*, 2000)。最近の研究ではボーリングコアサンプルによる新鮮な黒色頁岩からバイオマーカーとなるホバンなどが検出され、これらの黒色頁岩はシアノバクテリア起源の有機物の沈澱物であることがわかった (Brocks *et al.*, 1999)。

また、同様の炭素濃度の高い黒色頁岩は上位ハマスレー層群にも報告されている (たとえば、マウ

ントマックレー頁岩; Summons *et al.*, 1999). 黒色頁岩は有機物の死骸であり, 当時の海洋表層部には大量のシアノバクテリアが繁茂して, 光合成をしていたと考えられる. これらの黒色頁岩の上位には必ず厚い縞状鉄鉱層が重なることより, ジェリーナ層は縞状鉄鉱層形成過程についての鍵を握り, 初期地球の表層環境を急激に酸化させたシアノバクテリアや, 嫌気性海底でのメタン菌の活動記録を残した重要な地質帯である.

2) 縞状鉄鉱層

ハマスレー層群中の縞状鉄鉱層はマラマンバ (Marra Mamba), ブロックマン (Brockman), ブーゲーダ (Boolgeeda) の3層からなり, ベースリー川流域には質的に風化しにくい鉄鉱層の連続層序が観察できる. ハマスレー層群は, 縞状鉄鉱層の連続性が非常に良く, 西オーストラリア地質調査所の所長であったトレンドール氏は300km離れた南北の縞状鉄鉱層に分布する厚さ1mmのマイクロバンドを対比している (Trendall, 1990). この非常に連続性が良く, 陸源からの供給物を含まない細かな平行ラミナから, 縞状鉄鉱層は「遠洋性」環境に堆積したものであると考えられる. ベースリー川地域では3つの縞状鉄鉱層が連続的に観察できるため, それぞれが後でうけた同じ変形作用を差し引くことにより, 違った縞状鉄鉱層のもつオリジナルな特徴が観察される.

i) マラマンバ縞状鉄鉱層はハマスレー層群で最初の縞状鉄鉱層でジェリーナ層の黒色頁岩上に整合的に重なる (第7図-b). 特徴は石英ノジュールを含む厚いチャート層や鋳物的な鉄鉱層で他の2つの鉄鉱層に比べ鉄の沈積濃度が低く, また一枚一枚の縞を作るチャート・鉄ラミナも厚い (口絵B-3). また, チャート・鉄鉱層の間には変色したピンク・黄色 (ゲーサイト化している) の頁岩層を挟み互層になる (口絵B-4). マラマンバ縞状鉄鉱層の堆積年代は26億年前ごろといわれている (Blake and Barley, 1992).

ii) ブロックマン縞状鉄鉱層は非常に規則正しく成層した縞状鉄鉱層からなり, 黒色頁岩層 (マウントマックレー頁岩) に重なる. 本地層は全層厚650mに及ぶ世界最大の鉄鉱層で, ダレスゴージ部層 (Dales gouge member) (口絵B-1) とジョファ

一部層 (Joffre member) (表紙: ピルバラ中部のハマスレーレンジ内の滝つぼ) に分けられる. これは世界で最も詳しく調べられている縞状鉄鉱層の一つである.トレンドール氏はダレスゴージ部層のそれぞれの部層が16回繰り返す, そのおのおのが規則正しい縞組織をもつことを示した. この16回の数mの地層をメガバンド, それを構成する数cmオーダーの層をマクロバンド, 数mmオーダーのラミナをマイクロバンド (口絵B-2) と認識し, 当時の太古代の年層の可能性を指摘した (eg. Trendall, 1990). 本地域でも, 縞状鉄鉱層は1mmほどのチャートラミナと鉄粒子が配列したラミナの互層からなり, 鉄とチャートの比率の変化からラミナがある周期で形成されていることがわかる. また規則正しい縞状鉄鉱層中にシリカ濃集のブーデン状ノジュール構造 (石英ポッド構造) がみられ, 変成作用と初期変形組織として認識されている. ジルコンウラン鉛年代測定により縞状鉄鉱層に挟まれる頁岩中の酸性凝灰岩数カ所から $2470 \pm 3\text{Ma}$, またこの上位に重なる厚いウンガラ火山岩類も $2449 \pm 3\text{Ma}$ であることがわかっており, 比較的短時間にこれらの鉄鉱層は作られたことが明らかになってきた (Barley *et al.*, 1997).

iii) ブーゲーダ縞状鉄鉱層は全層厚100mで, 上部に数mの頁岩層を挟み2層にわかれる. この鉄鉱層の特徴は, 下位の縞状鉄鉱層に比べて圧倒的にシリカラミナの少ない鉄ラミナを主体とするもので, 所々に5mmほどの鮮やかな赤いチャートバンドを挟む (口絵B-5). この鉄鉱層は厚い流紋岩・デイサイト上に堆積した約30mの変質珪質頁岩層上に堆積している. その変質珪質頁岩層には石英脈, 鉄濃集脈が多く残っており縞状鉄鉱層堆積時には熱水活動が盛んであったと思われる. 特に頁岩と鉄鉱層境界部ではゲーサイト化した黄色い変質帯が卓越する.

これら縞状鉄鉱層の下位の地層には共通した層序パターンが認識できる. 下位から, 1) 黒色頁岩 (風化で白色化しているところも多い), 2) 小豆色・ピンク色頁岩もしくは黄色頁岩, 3) 化学沈澱物である層状チャート, と重なり, 最上位に4) 縞状鉄鉱層が重なる. この層序変化は32億年前, 35億年前の地層でも確認できることより, 縞状鉄鉱層形成のカギを握る層序ということになるだろう. これを「黒

色頁岩・チャート・縞状鉄鉱層シークエンス: BCB sequence」と呼ぶ(清川, 2000).

縞状鉄鉱層の形成については、大きく3つの成因が考えられている; 1) 陸の侵食によって、堆積盆に流れ込む説 (eg. Lepp and Goldich, 1964). 2) 直接堆積盆に火山性熱水堆積物が堆積する説 (eg. Trendall and Blockley, 1970; Morris, 1993; Isley, 1995). 3) 酸化状態の堆積盆中から鉄を多く含む水がアップウェリングし、より酸素の多い大陸棚で運ばれた鉄が酸化されて沈澱する説 (eg. Holland, 1973). このなかで、陸からの鉄の流れこみは、縞状鉄鉱層の岩相やREEの研究により現在は支持されていない (Bau and Moller, 1993).

さて、ハマスレー層群中の縞状鉄鉱層には静かな環境でたまった堆積層の部分と、火山活動や岩脈の貫入が残っているところがある。マーク・バーレー (M. Barley) らはハマスレー層群の上部にブルーム起源の火成岩の直上に縞状鉄鉱層の堆積する部分を発見し、海底で亜酸化鉄とシリカを大量に含む鉄が増加したために縞状鉄鉱層が形成したと考えている (Barley et al., 1997). これは、膨大な火山岩が共存し、酸素を関与せず縞状鉄鉱層が火成活動に伴って形成したであろうといわれる「アルゴマタイプ」(例、太古代のグリーンストーン帯中の縞状鉄鉱層) のでき方に相当する。しかし、ハマスレー層群は「遠洋性」環境であるが、大陸棚上に堆積していることから、ラブラドルトラフ (カナダ) など代表される「スペリオールタイプ」にその堆積場は類似する。このタイプは、鉄の起源は海洋にすでに供給されているものを使い、表層酸素を鉄の多い海水に混ぜること (たとえば、アップウェリング) で鉄鉱床を形成するとされている (eg. Holland, 1984). 膨大な黒色頁岩と縞状鉄鉱層の関連はこのモデルの方に都合がよい。

ただ、「黒色頁岩・チャート・縞状鉄鉱層シークエンス」を考えると、縞状鉄鉱層がアップウェリングの時にできるというのは都合が良すぎる。というのもこのシークエンスはもっと深い堆積場である太古代の鉄鉱層地帯にも見られるからである。また、バーレーが指摘した火山岩の上部に直接縞状鉄鉱層が堆積する例も、縞状鉄鉱層がたまっているところに火成活動が起こったと考えることもできる。

ここでは海洋は常に循環しており、大陸棚上も

基本的には遠洋と同じ海水があると仮定して考えてみる。25億年前の海洋中の鉄は太古代の期間、海嶺から供給が続けられており、それまで放出された大量の鉄を含んでいたはずである。そして、シアノバクテリアの繁殖により水中に供給された酸素の量が一定レベルをこえるとき、鉄 (Fe^{2+}) の酸化が急激にすすみ大量の鉄 (Fe^{3+}) が沈澱する。鉄が酸素を吸収してしまうと、鉄は沈澱できずに、再びバクテリアの酸素供給・表層酸素濃度の上昇まで黒色頁岩を堆積する。このようなことが繰り返すことにより、この時期海水中の鉄が陸上に固定し、酸素と鉄が平衡状態になるまで進むと考えられる。この酸素濃度の上昇メカニズムがおのおのの地質層序に現れているのが、太古代からみられる「黒色頁岩・チャート・縞状鉄鉱層シークエンス」の意味するところかもしれない。このように、シアノバクテリアの死骸である黒色頁岩 (酸素供給量) とその上位にたまった縞状鉄鉱層 (できた酸素の使用量) の規模・分布を定量化することは、当時の酸素放出量を見積もる上で重要な要素になると思われる。

今のところハマスレー層群での鉄鉱層の成因については、決着は付いていないが、スーパーブルームの活動、シアノバクテリアの大繁殖などが重要な引き金になり、大気中や表層海水中の酸素濃度が増えてきたのは確からしい。

3) 堆積岩類 (ウイトヌーンドロマイト)

マラマンバ縞状鉄鉱層とブロックマン縞状鉄鉱層の堆積間隙は1億年間である。この間ウイトヌーンドロマイト (Wittenoom dolomite) と呼ばれる厚いドロマイト層が堆積している。ドロマイト層はミクリテックで、上方へ薄層化している。このドロマイト層はピルバラ北部や東部では層厚が100mに達するが、南部では十数mしかない。北部ハマスレー地域の地層では、流れを示すクロスリナが残るところもあるが、陸源性の物質の供給は少なく、この当時ピルバラ大陸は水没していた可能性がある。大陸の水没した比較的浅い海でドロマイト層が発達するとともに、底層流や大陸からの無供給などによる堆積間隙 (ハイエイタス) があつたと考えられる。この静かにたまった炭酸塩の多い地層には当時の隕石衝突の証拠物質であるスフェルール層も見つかっている (Simonson, 1992).

4) 火山岩・ドレライト

(ウンガラ火山岩, ウイリーウォーリー層)

ハマスレー層群の層厚のうち40%以上は火成岩で, そのほとんどがブロックマン縞状鉄鉱層上部のウイリーウォーリー層 (Weeli Wolli Formation) 中の大量のドレライトシル, またその上位の層厚500mに及ぶウンガラ火山岩 (Woongarra volcanics) である (Black and Barley, 1992). ウンガラ火山岩下部は均質で薄緑色の塊状デイサイト・流紋岩溶岩で柱状節理が発達し, 上部は内部自破砕組織やフィアム (fiamme) などの溶結組織を含む (口絵B-6, 7). また酸性火山岩の噴出と大爆発にともなうバヨロラスティックフローによる堆積組織なども残り, 比較的浅い海底で形成されたと考えられる. Black and Barley (1992) では, この火山岩の化学組成に基づき南からの沈み込みに伴う背弧火成活動によるものと報告した. その後, 詳しい調査と化学分析によると, ドレライトなどの塩基性岩はNb, Ta, 以外のインコンパチブル元素に富んでいる大陸起源ソレアイト質玄武岩である. 400mに達する厚い流紋岩は, トリデマイトの残晶があることより900度以上の高温で噴出したもので, 中間的なLREEパターンを持ち, Nb, Ta, Ti, Euの負の異常がある岩石であった. この大陸起源のソレアイトの噴出と高温で大量の酸性火成活動は顕生代で報告されている巨大火成岩岩石区 (large igneous province) の特徴に非常に類似することより, 当時のピルバラ地域は巨大火成岩岩石区 (large igneous province) になっていたと結論づけている (Barley *et al.*, 1997).

C: チューリークreek層群

チューリークreek層群はブーゲーダ縞状鉄鉱層に整合的に重なり, 層厚5,000mの上方粗粒化する浅海性堆積岩層である. 地層は下部の頁岩層を主とするクンガーアラ層 (Kungarra Formation) と上部の砂岩層からなるカップット層 (Kazput Formation) からなり, クンガーアラ層は淡緑色頁岩を主体とし, 中部にはダイアミクタイト層を挟んでいる. カップット層はクオーツァイト, 赤色堆積岩, ドロマイトなどの浅海性の堆積物で特徴づけられ, 上部をより若いベスリー川コーツァイト層に不整合で覆われている (Trendall, 1990; Martin *et al.*, 2000). 変成度は低くプレーナイト・パンペリアイト相である

(Smith *et al.*, 1982). 堆積年代は地層の下位の2449±3Maのウンガラ火山岩 (Wonngarra volcanics) と上位の2209±15Maのチェーラスプリングス玄武岩 (Cheela Springs Basalt) より, 24-22億年前である.

本地層はピルバラ南部にしか存在せず, 地層内の何回もの不整合の存在やフォーテスキュー層群とは異なる西から東へ流れる古流向より, ピルバラクラトンとイルガークラトンの衝突事件であるカブリコン造山運動 (19億年前) に先駆けた衝突に伴うフォアランドベースンであると考えられている (Powell *et al.*, 1999; Martin *et al.*, 2000). 本層群はテクトニックな堆積場の違いにより, ハマスレー堆積盆と区別してマックグラストラフ (McGrath trough) と呼ばれている (Martin *et al.*, 2000).

1) ダイアミクタイト (Meteorite bore member)

泥質マトリックス優勢の円礫層が厚い緑色頁岩層中に分布する. ここでは, 葉理の発達したシルト層にドロマイトや酸性凝灰岩の円礫が食い込むように下側の層理を凹ませるドロップストーン組織を残し, 氷河起源のダイアミクタイト層と考えられている (Trendall, 1976; Martin, 1999). これは当時北米 (Huronian)・南アフリカ (Transvaal)・フィンランド (Sariolinan) とともに低緯度 (5-11°) での氷床が世界的に発達し, 寒冷であったことを意味している (Martin, 1999).

2) ドロマイト

頁岩層中には部分的に数十mにおよぶドロマイト層が発達する. この地層は特にロッカリードームから西に100kmほどのワイールドーム地域 (Wyloodome) で発達している. ドロマイト中にはキャベツ型のストロマトライト層が発達し, ストロマトライトの重なり傾きより当時の太陽の方向を見積もろうとした例もある (Powell *et al.*, 1999, excursion guide).

3) 赤色堆積岩層・クオーツァイト

上部砂岩層 (Kazput Formation) は上方粗粒化, 浅海化し, 波高30-50cmのクロスベツトやウエーブリップルを持ち, 東西2方向の流れが観察される潮干帯-デルタ環境から, 東から西への河川環境を

示す砂岩層になる。砂岩中のジルコンについて CHIME 年代は32-30億年前のものが多く、ピルバラクラトンの基盤岩類から流れてきたものと考えられる。このクオーツァイトを主体とする砂岩層は上位になると真っ赤な赤色砂岩になる(口絵C-1, 2)。これは、石英粒子間隙にある粘土鉱物のまわりの鉄微粒子の酸化作用による色の変化であり、単に縞状鉄鉱層の破片が流れてきたものではない。このような浅い堆積環境での岩石の酸化作用とその保存は、当時の地球表層部にはかなりの量の酸素で満たされていたが、浅海域では貧有機物環境であったことが考えられる。この時代になると、有機物が大発生したジェリーナ層の堆積当時とは大気組成や生物生産性などがかなり変化したことがわかる。当時酸素濃度はそれまでの無酸素に近い状態から1/1000~1/100 (0.001-0.0001PAL; present atomsphere level) になったといわれている (Kasting, 1993; Eriksson and Cheney, 1992)。

このように、チューリーク層群には急激な海退により再び海面に浮かび上がった原生代初期の大陸の環境が保存されている。この原生代初期は最近注目されている7億年前の全地球凍結事件 (eg. Hoffman *et al.*, 1998; Karr, 2000) と似たような地球規模氷期の可能性があり、チューリーク層群にはその記録が残っているようである。

3. 鉄鉱床と造山運動

ピルバラクラトン南部は19億年前のカプリコン造山運動により、基盤も巻き込んだフォールドアンドスラスト帯を形成する。世界最大の鉄鉱床はこれらの褶曲軸の部分にあり、特に19億年前の褶曲軸・断層に沿って、縞状鉄鉱層がミネラリゼーションをおこし鉄含有量が90%以上の品位の高い世界規模の大鉄鉱床が形成されるらしい (Powell *et al.*, 1999)。

4. 海水準変動とスーパープルーム

マウントブルース超層群についてジルコン・ウラン鉛年代からもとめた堆積年代と堆積層厚から見積もった堆積速度の変化、堆積ファシスから当時の海水準を推定した(第7図)。ここではハマスレー

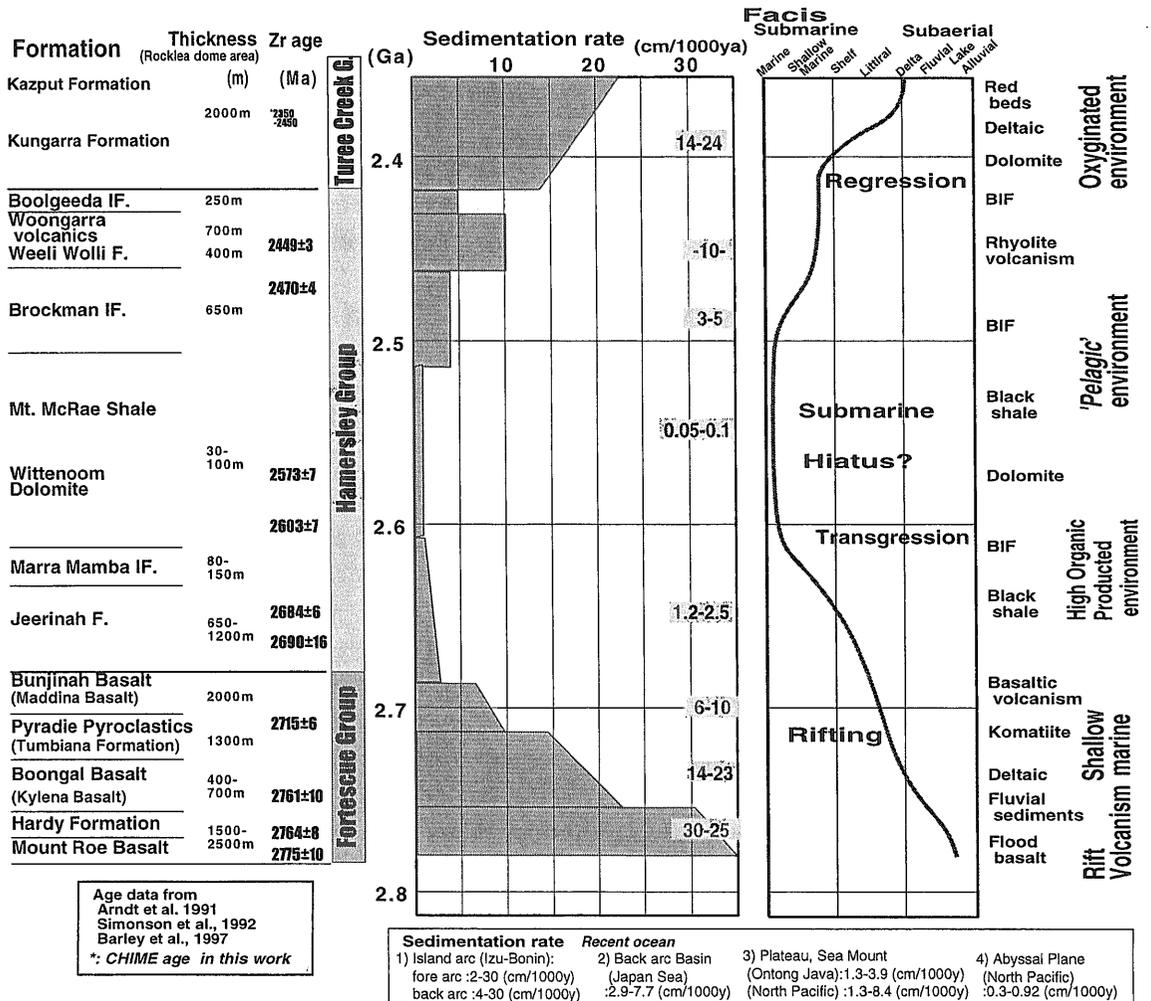
層群を中心に5億年間での一大海進・海退作用が起こっていることがわかる。この図にそって当時のピルバラクラトンのできごとをまとめてみよう。

27.7-26.7億年前には大規模火成活動に伴い急激な海進がはじまる。この火成活動によって形成されたフォーテスキュー層群は、北部ピルバラ地域について当時西オーストラリア大学の学生であった T.ブレイク氏によって詳しく調べられ、南北性の正断層、つまり東西伸張による大陸地殻の分裂の開始に伴うものであると考えられた (Black, 1993)。南部のロッカリドーム地域でも、南北にのびる西ロッカリドーム岩脈の方向やハーディー層の西方向への古流向などから、東西方向の伸張場であったと考えられる。またピルバラ南部におけるフォーテスキュー層群には枕状溶岩などより深い堆積相をもつことより、伸張場の中心がピルバラ南部にあったようである。また、浅海性の厚いハーディー層の存在は当時大陸が著しく侵食されていた状態であったと考えられる。

26億年前にはジェリーナ層が堆積した。このときには北部ピルバラまで急激に海水が侵入して浅瀬が広がり、海水の表層には赤潮が発生するようにシアノバクテリアが大発生している。その死骸が無酸素の海底に沈殿し、厚い黒色頁岩層が作られた。ハーディー層形成時期に、リン、カルシウムを含む大陸地殻が急激に侵食され、浅海域では栄養塩に富んだ海になっていた可能性があり、ジェリーナ層堆積時は生物の大発生には良い条件が重なったと考えられる。厚い黒色頁岩は当時のシアノバクテリアの繁殖の凄さを物語っており、同時に酸素の大気中への排出量もかなりのものであったと考えられる。また、非常に軽い炭素同位体比をもつこの黒色頁岩は、海底下でのメタン細菌・硫酸還元菌による有機物の分解作用をうけており、酸素の無いところでも著しい生物活動が起こっていたことを示している。

25-24億年前のハマスレー層群形成時期が海進の絶頂期であり、地層は陸からの供給のない「遠洋性環境」になった。これは、海水準の上昇のために当時の陸地が水没し、陸からの流れ込みが少なくなったことを意味する。一般的な縞状鉄鉱層の堆積深度は、その層序の特徴から数十mから700m ぐらいの水深で堆積したと考えられている (Isley,

Estimate sedimentation rate and sea level change of the Mount Bruce Supergroup



第8図 マウントブルース超層群における堆積速度と海進曲線。最新の年代値と地層層厚から地層の堆積速度を求め、また、堆積相から当時の海水準カーブを見積もり、当時どのような環境であったかを復元した。

1995). ハマスレー縞状鉄鉱層も細かいラミナ以外に波の影響などが無いことより、波浪限界よりも深い水深約200m以深といわれている (Simonson et al., 1993).

当時の海洋は初期地球形成以後の連続的な火成活動、特に27億年前の世界性的な火成活動により十分な鉄が供給されており、これと浅海域での爆発的なシアノバクテリアの活動による酸素排出により、海水中の鉄を酸化することで世界最大の縞状鉄鉱層になったことが予測できる。黒色頁岩-縞状鉄鉱層シークエンスはその堆積メカニズムの鍵をにぎっている。また、かなり早い堆積速度 (3-

5cm/1,000年以上)を持つことが明らかになった縞状鉄鉱層の規則正しい縞模様は、トレンドール氏の予想通り当時の年層 (たとえば、ミランコビッチサイクル) の記録である可能性が高くなった (Trendall and Blockley, 1970).

24億年前以降のチューリークリーク層群になると、地層は急激に浅海化する。世界規模の氷河性のダイアミクタイトの存在により、当時寒冷化が起こったことはほぼ間違いなく、海水準低下で陸が海面に出てきたと考えられる。表層大気は酸化式的だが、海底や陸上は貧栄養環境であるため、堆積物は赤色堆積岩になった。

この時代、つまり太古代末期から原生代初期にかけて他の地質帯においても類似層序が見られる。たとえば、南アフリカカプバルクラトン上のウィットウォーターランド層やトランスバル層は、30億年前の大陸上に大量の火山岩、海進を示す堆積岩層、そして上部には縞状鉄鉱層が重なっている。この層序の類似性と分裂に関連すると思われる原生代の変成帯の分布から、当時ピルバラとカプバルクラトンは1つの超大陸バルバーラ(Vaalbara)が提案されている(Cheney, 1996)。そのほかにも、カナダ北西部、スレーブクラトンのブラックリバー火山岩コンプレックスにも25億年前の浅海火山岩層があり、その上位にドロマイト、黒色頁岩、縞状鉄鉱層の地層が残っている。また、この時期の海洋起源といわれていた玄武岩の多くが、詳しい化学分析により、固まる以前のマグマが大陸起源物質に汚染されたもので、つまり、大陸地殻内から噴出したものであることが解ってきた(Arndt, 1999)。このように汎地球的な海水準の上昇で太古代末期から原生代にかけて大陸は水没していったようである。

この太古代末から起こる大海進・海退イベント記録は顕生代の大陸分裂時のものと良く似ている。特に白亜紀では海進時には世界中を浅い海が覆い、ヨーロッパなどでは広範囲にチョーク層が堆積する大海進時代が起こっている。陸地が少ない白亜紀では陸上からの堆積物供給がなくなり、いわゆる「遠洋性」の環境になったのである。また海洋中には何回もの貧酸素状態が発生して黒色頁岩が堆積し、現在の石油資源のもとになっている(Arthur *et al.*, 1987)。海水準上昇や気温の上昇など様々な白亜紀の異変は太平洋のスーパープルーム活動が引き起こしたといわれている(Larson, 1991a, b)。熱活動が高く、栄養塩の欠乏、貧酸素濃度状態のこの時期は太古代の環境に良く似ており「先祖返りの時代」と呼ばれる。(平, 1991; 平・清川, 1998a, b)。その後、第三紀に入るとこの活動が収まり、海退に伴う寒冷化が起こり氷期に移り変わる。地球史とは冷却史ともいわれるが、白亜紀ではプルーム活動により一時的に暖かい初期地球の状態に戻ったのである。

さて、問題の太古代後期であるが、27億年前からピルバラやカプバルクラトンの大陸上の火成活

動のみならず、世界的に火山活動が活発になり、カナダ(スベリオール帯、スレーブ帯)、アフリカ(ジンバブエ帯)、西オーストラリア(イルガルン帯)では島弧活動とそれに伴う付加作用が報告されており(eg. Nelson, 1998)、また、インドや南極でも高温変成岩類はこの時期につくられている(Choukroune *et al.*, 1995; Harley and Black, 1997)。いままで述べてきた海水準変動、岩石の化学組成などから、この時代には世界的なスーパープルームの活動があったと考えられている(eg. Barley *et al.*, 1997)。その開始から影響が終わるまでは少なくとも白亜紀の5倍の5億年間の活動史があり、地球史上最大のイベントの一つといってよいだろう。この活動がきっかけとなり地球は急速に生命の住みやすい地球へと進化していったのである。27億年前から始まる地球大変動の原因については、固体中心核の形成、マントル対流の1層から2層対流への変化、マントルの急激なオーバーターンなどが考えられている(Maruyama, 1994; 丸山・磯崎, 1998; Nelson, 1998)。いずれにせよ、マウントブルース超層群には、地球規模のプルーム活動の痕跡、表層環境の大変化、光合成生物を大発生させた原因などが隠されており、この地層群をより詳しく研究することで、地球史上のターニングポイントである太古代-原生代境界でのテクトニクス変遷や生物の進化史がいつそう明らかになっていくであろう。

5. まとめ

マウントブルース超層群は太古代後期のテクトニクスや表層環境の激変時期の記録を詳しく残した地質帯である。そこでは、大海進が起こり、浅い大陸棚には生命が急激に大繁栄し、それに伴う酸素濃度上昇、世界規模の縞状鉄鉱層の堆積、赤色堆積岩の堆積が記録されていた。このマウントブルース超層群の記録から導かれる約28億年前から起こった地球規模のスーパープルーム活動は、酸素発生や生物繁栄の原点を作るとともに、鉄鉱床形成など現在の鉄産業などにも直接恩恵を与えているのである。今後、このマウントブルース超層群の研究は、生物進化、地球表層環境変化、地球内部の活動史をより深く探る上でますます重要になって

くと思われる。

謝辞: この研究にあたっては, 平 朝彦教授 (東大海洋研), 芦 寿一郎博士 (東大), 山口耕生氏 (Penstate 大学), 水島禎二氏 (東北大), また西オーストラリア大学の Chris Powell 教授, Mark Barley 教授, John Williamson 氏にお世話になった。また, 年代測定 (CHIME 法), 岩石薄片鑑定は国立科学博物館で行い, 地学研究部の人々にお世話になった。重ねてお礼申しあげます。

引用文献

- Arndt N.T., Nelson D.R., Compston W., Trendall A.F. and Thorne N.T. (1991) : Australian Journal of Earth Sciences, 38, p.261-281.
- Arndt N.T. (1999) : Precambrian Research, 97, p.155-164.
- Arthur M.A., Schlanger S.O. and Jenkyns H.C. (1987) : American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 63, p.870-885.
- Barley M.E., Pickard A.L. and Sylvester P.J. (1997) : Nature, 385, p.55-58.
- Bau M. and Moller P. (1993) : Geochimica et Cosmochimica Acta, 57, p.2239-2249.
- Black T.S. (1993) : Late Precambrian Research, 60, p.185-241.
- Black T.S. and Barley M.E. (1992) : Tectonics, 11, No 6, p.1,415-1,425.
- Blight D.F. (1985) : Geological Survey of W. A. Report, 13, 25p.
- Brocks J.J., Logan G.A., Buick R. and Summons R.E. (1999) : Science, 285, p.1,033-1,036.
- Cheney E. S. (1996) : Precambrian Research, 79, p.3-24.
- Choukroune P., Bouhallier H. and Arndt N.T. (1995) : Geol. Soc. London. Spec. Publ., 95, p.67-68.
- De la Hunty L.E. (1965) : Mount Bruce, Western Australia. Geological Survey of W. A. 1:25000 geological series, 29p.
- De Wit M.J. and Ashwal L.D. A. (1997) : in Greenstone Belt. eds. M. De Wit and Ashwal L.D., Oxford Science publications. p.9-17.
- Eriksson P. G. and Cheney, E. S. (1992) : Precambrian Research, 54, p.257-269.
- Eriksson P.G. (1999) : Precambrian Research, p.143-154.
- Eriksson P.G., Mazumder M., Sarkar S., Bose P.K., Altermann W. and van der Merwe R. (1999) : Precambrian Research, p.253-268.
- Harley, S. L. and Black, L. P. (1997) : Antarctic Science, 9, p.74-91.
- Hickman A.H. (1983) : Geological Survey of Western Australia Bulletin, 127, p.268.
- Hoffman, P.F. (1998) : Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 16. p.543-603.
- Hoffman, P.F., Kaufman, A.J., Halverson, G.P. and Schrag, D.P. (1998) : Science. 281, p.1,342-1,346.
- Holland H.D. (1973) : Economic Geology, 68, p.1,169-1,172.
- Holland H.D. (1984) : Princeton University Press, 589p.
- Isley, A.E. (1995) : J. Geology, 103, p.169-185.
- Kakegawa T., Kasahara Y., Hayashi K. and Ohomoto H. (2000) : Geochemical Journal, 34, p.121-133.
- Kasting J. F. and Ackerman T. P. (1986) : Science, vol.234, p.1,383-1,385.
- Kasting J. F. (1993) : Science, 259, p.920-926.
- Karr, R.A. (2000) : Science, 288, p.1,316.
- 清川昌一 (2000) : 地学雑誌, 109, No. 1 (968), p.130-139.
- 清川昌一・池原 実 (1999) : 日本地質学会第106年学術大会講演要旨 名古屋大学, p.154.
- Krapez (1993) : Precambrian Research, 60, p.1-45.
- Kriewaldt M. J. (1963) : Geol. Survey of Western Australia Ann. Rept. 1964.
- Larson R.L. (1991a) : Geology, 19, p.547-660.
- Larson R.L. (1991b) : Geology, 19, p.963-966.
- Lepp H. and Goldich S.S. (1964) : Economic Geology, 59, p.1,025-1,060.
- Martin D.M. (1999) : Geol. Soc. America Bull., 111, 2, p.189-203.
- Martin D.M., Powell C.M. and George A.D. (2000) : Precambrian Research, 99, p.33-64.
- Maruyama S. (1994) : Journal of Geological Society of Japan, 100, 1, p.24-49.
- 丸山茂徳 (1995) : 科学, 67, p.498-506.
- 丸山茂徳・磯崎行雄 (1998) : 岩波新書, 275p.
- Morris R.C. (1993) : Precambrian Research, 60, p.243-286.
- Nelson D.R. (1998) : Earth and Planetary Science Letters, 158, p.109-119.
- Nelson D.R., Trendall A.F. and Altermann W. (1999) : Precambrian Research, 97, p.165-189.
- Powell C. M., N. H. S. Oliver, Z. Li, D. McB. Martin and J. Ronaszeki (1999) : Geology, 27, 2, p.175-178.
- Simonson B. M. (1992) : Geol. Soc. America Bull., 104, p.829-839.
- Simonson B. M., Schubel, K.A. and Hasslev, S.W. (1993) : Precambrian Research, 60, p.287-335.
- Smith, R.E., Predrix, J.L. and Parks T.C. (1982) : Journal of Petrology, 23, p.75-102.
- Summons R.E., L.L. Jahnke, J.M. Hope and G.A. Logan (1999) : Nature, 400, p.554-557.
- Sylvester P.J., Harper G.D., Byrely G.R. and Thurston P.C. (1997) : in Greenstone Belt. eds. M. De Wit and L.D. Ashwal, Oxford Science publications, p.55-90.
- 平 朝彦 (1991) : 科学, 61, p.657-662.
- 平 朝彦・清川昌一 (1998a) : 科学, 68, p.50-61.
- 平 朝彦・清川昌一 (1998b) : 地球進化論 第7章, 岩波書店, p.447-520.
- Trendall A. F. (1976) : Geol. Survey of Western. Australia Ann. Rept., p.88-92.
- Trendall A. F. (1990) : Geology and Mineral resources of Western Australia, p.163-194.
- Trendall A. F. and Blockley J. G. (1970) : Geol. survey of Western Australia Bull., 119, 366p.
- Tyler I.M. (1990) : in GSWA Memoir 3, Geology and Mineral resources of Western Australia, p.191-194.
- Windley B. F. (1995) : John Wiley and Sons, 526 p.
- KIYOKAWA Shoichi (2000) : Mount Bruce Supergroup - "Global scale environmental change recorded in the Archean/Proterozoic boundary from the Pilbara Craton, Western Australia".

< 受付 : 2000年5月12日 >