

# 南アフリカ, Barberton グリーンストーン帯 の金鉱床 —31億年前の鉱化作用—

渡辺 公一郎<sup>1)</sup>・林 秀<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

南アフリカ Transvaal 州の鉱床巡検に参加し、そのうち4日間東部の Barberton に滞在した。Barberton 地域では、砂金が発見された1881年以降約1世紀の間に350を越える鉱山が開発され(第1図)、合計すると約300 t の金と約10 t の銀を産出している。現在、年間0.5 t 以上の金を産しているのは Sheba, New Consort, Fairview, Agnes の4鉱山である。

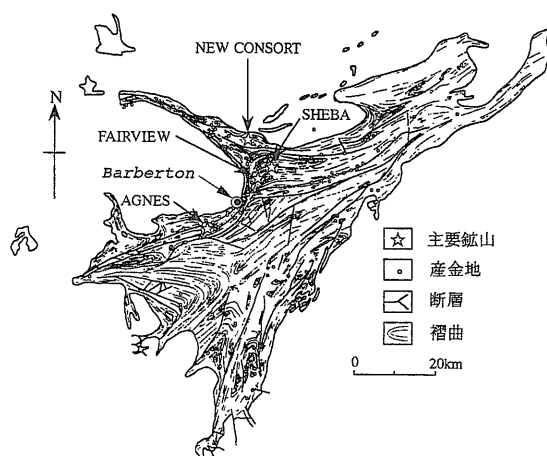
Barberton グリーンストーン(緑色岩)帯は世界最古(31億年前)の金鉱床地域として知られる。これまで地球上で掘り出された金の7割近くは始生代グリーンストーン帯と関わりを持つとされているが、その成因については依然として不明な所が多い。今回の巡検案内役の C. デロンダ氏は最近、Barberton グリーンストーン帯の金鉱床を再検討するため詳細なフィールドワークに加えジルコンの U-Pb 年代、安定同位体、流体包有物組成などについて精力的な研究を行い、グリーンストーン帯の金鉱床の成因について重要な結果を報告している(de Ronde et al., 1992)。

今回、始生代の金鉱床と、母岩となるグリーンストーン帯の岩石や地質構造について、多くを見聞することができた。さらに、現在も金を採掘している主要鉱山の一つ、Agnes 鉱山を訪ねることができた。三十億年以上も前のプレート発散境界での海底→陸上の火山活動や熱水変質作用、そしてプレート収束境界で生じた短縮テクトニクスを示す地質構造など日本の四万十層群で見られるような地質現象が良く保存されているのに驚かされた。C. デロンダ氏の熱心な説明により、グリーンストーン帯の金鉱床の成

因論についての理解がずいぶん深まったと思う。南アフリカの鉱山開発の現状も詳しく見ることができ、さらに日本でそれらを紹介するためのビデオ映像の撮影も行うことができた。現場で書き留めたメモに加え、鉱山の資料(Pepper and Plessis, 1991)、C. デロンダ氏の鉱床成因や鉱化時代についての論文(de Ronde et al., 1992)、さらに氏の現地での説明などを参考にして、Barberton 地域の金鉱化作用について概説したい。我々が訪れた Agnes 鉱山については少し詳しい説明を加えた。

## 2. 地質概略

Barberton グリーンストーン帯は主として緑色片岩の変成作用を受けた堆積岩や火山岩より構成される。これらは三つの地質ユニットに分けられている。最下部をなすのは塩基性→超塩基性火山岩(コ



第1図 Barberton グリーンストーン帯の地質構造と金鉱床の位置。Anhaeusser(1986)の図を簡略化。

1) 九州大学工学部資源工学教室：  
〒812 福岡市東区箱崎6-10-1

キーワード：南アフリカ, Barberton, グリーンストーン帯, 始生代, 金鉱床, Agnes 鉱山

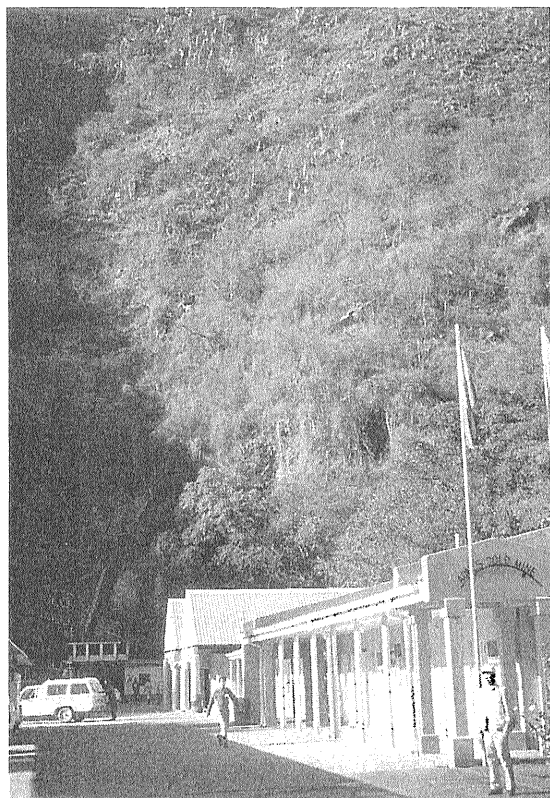


写真1 北側から見た Agnes 鉱山の事務所と坑口(左下)。切り立った崖は Moodies 層群の粗粒な堆積物よりなる。東西走向で傾斜がほぼ垂直の地層面が大きな崖を形成している。

マチアイトを含む)を主体とする Onverwacht 層群で、この上にグレイワッケ、頁岩、チャート、縞状鉄鉱層よりなる Fig Tree 層群が整合的に重なる。これらを砂岩、礫岩よりなる Moodies 層群が不整合に覆う(de Ronde・佐藤, 1993, 本誌1993年1月号口絵参照)。

これらの地層は東西～北東方向に軸を持つ褶曲構造と同方向のスラストにより短縮テクトニクス下にあったことが分かる。スラストの主要活動時期は3回認められており、その U-Pb 年代は  $D_1$  期; 34.5–34.4億年,  $D_2$  期; 32.3億年,  $D_3$  期; <31.6億年と報告されている(Armstrong et al., 1990; de Ronde et al., 1991など)。トーナライトやトロニエマイトなどの深成岩類が周囲に分布しており、侵食により低地を形成しているため、Barberton グリーンストーン帯は比高500 mを越える褶曲山地となっている。

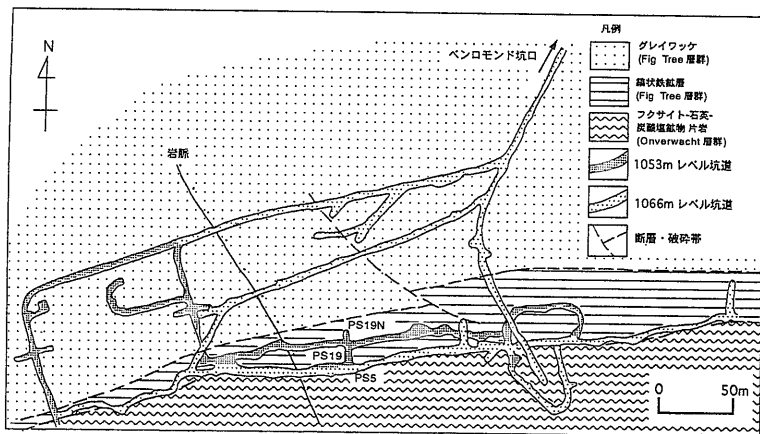
### 3. Agnes 鉱山

Agnes 鉱山は Barberton の町より南東へ約10 kmの所にある。我々は Barberton のロッジを早朝出発し、鉱山へ向かった。鉱山事務所と坑口は切り立った崖下にある(写真1)。まず事務所で鉱山の概要について説明を受けた。

本鉱山は1890年に採掘開始後、1949年に Eastern Transvaal 社(ETC)の所有となり現在に至っている。1983年までの生産量は金19 t, 銀1 t, 現在の金の産出量は50~55 kg/月、品位は5~5.5 g/tである。人員は約500人であったが、鉱山の規模に較べて多いように思う。現在稼行の対象となっている鉱体が2ヶ所あり、その1つ、Prinston 鉱体を見ることになった。

入坑前に緊急時のための酸素救命具が各自に配布され、スタッフから使用法の説明を受けた。少々緊張する一瞬である。午前9時に入坑した。Agnes 鉱山の17レベルの坑口(標高1053 m)からほぼ水平の通道坑をディーゼル車で約4 km南東へ進むと Prinston 鉱体に到着した。坑口と同じレベルでも地表下約500 mになっている。坑内設備はかなりしっかりしているように見え少し安心する。ここからさらにトラックレス坑道を坑内専用車で120 m上り、富鉱体の一つ PS19N の切羽へ到達した。

鉱体はほぼ東西方向の走向をもち南へ80度傾斜(逆転)した縞状鉄鉱層(BIF)中に胚胎している(第2図)。BIFはグレイワッケよりなる Fig Tree 層群の最下部に延長550 mのレンズ状に発達している。層厚は最大60 mで東西へ薄くなり消滅する。破碎帯をはさんで上盤(南)側にクロム雲母(fuchsite)-石英-炭酸塩よりなる結晶片岩(Onverwacht 層群に相当)が接している。断層をはさんでさらに上盤側にイライト-ドロマイトの生じたグレイワッケ層が分布する。このうち稼行対象となっている鉱脈は破碎帯に接した BIF 内の1~15 mの部分である(写真2)。我々の訪れた PS19N の他、PS19 と PS5 の3ヶ所に富鉱部が見られる。PS19N では著しい黄鉄鉱化作用に加え、破碎帯沿いに石英脈の形成と変形作用が見られる(写真3)。金は BIF 中の黄鉄鉱に伴って産することが多い。黄鉄鉱の産状によって金の品位に以下のような明瞭な差が認められている。すなわち細粒で半自形の光沢のない'dirty'な



第2図 Agnes 鉱山 Princeton 鉱体の地質概略図と坑道図 (Pepper and Plessis, 1991). 富鉄体 PS19N の1174 m レベル(図中の坑道より上)の切羽を見学した。

黄鉄鉱は金を伴っており、破碎帯の形成と同時期に生成したと考えられている。金は黄鉄鉱に包有されているか表面に付着し、まれにこれとは独立の金粒も見られる。暗褐色のチャートの縞に生じた極細粒のフランボイダル黄鉄鉱は破碎作用前に生成しており、金を伴わない。破碎作用を受けておらず結晶形がよく保存されている黄鉄鉱にも金が伴わない。破碎帯付近では母岩の縞状構造が明瞭でないところが多く、このような所は金の品位が高い。

破碎面に沿ってグラファイトが多量に生成している所も見られる(写真3)。C.デロンダ氏の説明によれば炭素同位体比を調べた結果、グラファイトの炭素の起源は35億年前のバクテリアということであった。変形作用をあまり受けていない Fig Tree 層群のBIFからは藍藻やバクテリアの化石が見つかったので、考えられないことはない。グラファイトは後の鉄化作用の時に還元剤として働いたと考え

ることもできる。

#### 4. 鉄化作用と時期

de Ronde et al. (1992)は Barberton グリーンストン帯の代表的な金鉄床を選び、鉄物の共生関係により鉄化作用を四つのステージに分けた(第3図)。すなわち、変形作用を受ける前の超塩基性母岩や初期変成作用を反映した鉄化作用に始まり、金、卑金属鉄物、黄鉄鉱、硫砒鉄鉱などで特徴づけられる鉄化作用が主要変形時期に生じた(第1期)。この時期に主な石英-方解石脈が形成され、クロム雲母、セリサイト、電気石なども生じている。変形作用終了後、金を含まない黄鉄鉱、硫砒鉄鉱、四面銅鉄



写真2 Princeton 鉄体の縞状鉄鉄層(BIF)の産状。淡色の縞を呈するのが黄鉄鉱で、金を伴っている。



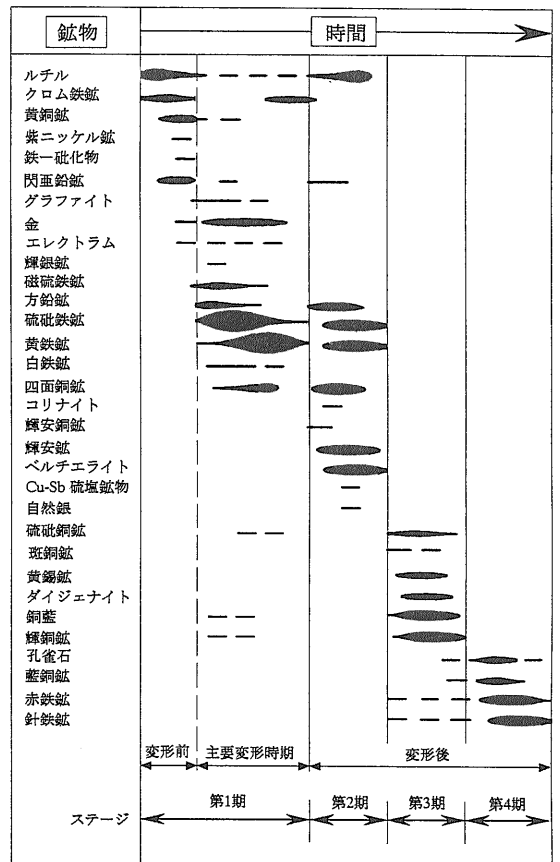
写真3 変形作用(D<sub>3</sub>)を受けたBIFとさらにそれらを切る含金石英脈。左手に破碎帯に沿って生じたグラファイト層が見える。炭素同位体比の研究からバクテリア起源とされている。

や、輝安鉱、ベルチエライトのようなアンチモン鉱物、ルチルなどが生じた(第2期)。さらに硫砒銅鉱、斑銅鉱、黄錫鉱、ダイジェナイト、銅藍、輝銅鉱などの銅鉱化作用が続いた(第3期)。最後に二次的な酸化作用で孔雀石などの銅炭酸塩鉱物が生じている(第4期)。また金鉱化作用はD<sub>3</sub>期の活動と同時期ないしその直後に起こっており、同一起源の鉱化流体によって生じたと考えている。

金鉱化作用の生成時期についてはde Ronde et al. (1991)により放射年代の検討が行われた。この報告によれば、Fairview鉱山の深部に見られる珪長質岩脈群の生成年代が、含まれるジルコンのU-Pb年代測定により $31.26 \pm 0.21$ 億年と示された。この岩脈群は貫入後に金鉱化作用を伴う剪断作用を受けており、その後の熱水変質作用により生じたルチルのU-Pb年代測定の結果は $30.84 \pm 0.18$ 億年の値を示した。従って金鉱化作用はこれらの二つの年代の間、すなわちほぼ31億年前に生じたとしている。

## 5. 鉱化流体の起源

他の始生代グリーンストーン帯の金鉱床と同様に、Barbertonの金鉱床の成因についても数多くの説が提案されている。Anhaeusser et al. (1969)をはじめとする多くの研究者は、金が最初から塩基性～超塩基性火山岩あるいはそれらに伴う堆積岩に含まれており、後の花崗岩を伴う変成作用の過程で金が破砕帯に移動・集積したと考えている。鉄と金に富む層状堆積物は海底噴気活動で同生的に形成されたと考えるのが一般的であった。それらに貫入した花崗岩は金が再移動し沈澱濃集する熱水系の発達に必要な熱源や地質環境の形成に重要な役割を持つと考えられた。Barbertonの産金地帯は北東部のKaal Valley トーナライトを取り囲むように分布しており、この岩体を熱源とする熱水系が生じて金の濃度上昇が起こったとの考えも出された(de Wit et al., 1982)。これらに対し、de Ronde et al. (1992)は広い範囲にわたる鉱床母岩の微量分析を行った。その結果、Cu, Pb, Zn, Agの濃集が見られる事はあるので海底熱水鉱化作用の形跡は認められるが、金の濃度は1 ppb以下で、母岩はもともと金に富んでいなかったとしている。一方でKaal Valley トーナライトのU-Pb年代は金鉱化作用よりも1億年以



第3図 Barberton 金鉱床の鉱石鉱物の生成順序。主要変形作用との時間的關係も示されている。de Ronde et al. (1992)より簡略化。

上古く、この深成岩体が金の鉱化作用と直接関係のない事も示している。Kamo and Davis (1991)は金鉱化作用とはほぼ同時期の火成活動の証拠を見いだした。Barberton グリーンストーン帯北方に露出するNelspruit パソリス(31.06億年)と南方のStentor 深成岩(31.08億年)、Mpuluzi パソリス(31.07億年)である。重力データは金鉱床地域の下部に花崗岩の存在を示唆しているため、31億年前の金鉱床の生成に関与した深成岩体の存在は否定されていない。

広域変成作用に伴う脱水反応で生じた鉱化流体が含金石英脈中の金をもたらしたとする考えもある。鉱石中の流体包有物の組成が低塩濃度でCO<sub>2</sub>濃度が比較的高いことからこの考えは支持されており、角閃岩相付近などでそのような流体が生じるとされている(Kerrick and Fyfe, 1981)。しかし金鉱化作用と同時期に活動したD<sub>3</sub>期の変成作用に伴う

脱水反応で鉱化流体が生じた可能性を de Ronde et al. (1992) は否定している。

Barberton グリーンストーン帯の金鉱化作用は後生的であり、母岩の塩基性～超塩基性火山活動に伴う同生鉱床でないことが示された。変成作用に伴う鉱化流体説も受け入れられなかった。西オーストラリアやカナダ、Abitibi のグリーンストーン帯などに分布する金鉱床群も Barberton における鉱化作用と類似点が多いので、互いに比較しながら鉱化作用のメカニズムについてさらに詳細な研究を行う必要がある。

## 6. 終わりに

Barberton を我々が訪れた9月は早春であったが、すでに鮮やかな原色の花々が咲き乱れていた。毎日晴天が続き、紺碧の空から降り注ぐ日差しの強さが心に残った。

Agnes 鉱山では鉱山のスタッフに大変な歓待を受けた。特に坑内を見学後、坑口の直上にあるビューフェで御馳走になった南ア料理とビールの味は忘れられない。1994年春の全人種による総選挙を半年後に控え、鉱山黒人労働者は希望に満ち、白人スタッフは不安げにも見えた。政権が変わっても南アフリカの豊かな鉱物資源の開発が順調に進み、政治・経済問題が平和解決されることを望まずにはいられない。

謝辞：今回の南アフリカ地質巡検を企画・実行された地質調査所の浦辺徹郎、C. デロンダ両博士をはじめ巡検参加者の皆さんには大変お世話になった。金属鉱業事業団南アフリカ出張所の奥泉洋一氏には資料収集にご協力いただいた。九州大学の井沢英二教授には原稿に目を通していただいた。これらの方々に感謝の意を表す。

## 参考文献

- Anhaeusser, C. R. (1986): Archean gold mineralization in the Barberton Mountain Land. In: Anhaeusser, C. R. and Maske, S., (eds.), Mineral deposits of southern Africa: Geol. Soc. South Africa, 1, 113-154.
- Anhaeusser, C. R., Mason, R., Viljoen, M. J. and Viljoen, R. P. (1969): A reappraisal of some aspects of Precambrian shield geology. Bull. Geol. Soc. Amer., 80, 2175-2200.
- Armstrong, R. A., Compston, M. J. de Wit, M. J. and Williams, I. S. (1990): The stratigraphy of the 3.5-3.2 Ga Barberton Greenstone Belts revisited: a single zircon ion microprobe study. Earth and Planetary Sci. Lett. 101, 90-106.
- de Ronde, C. E. J., Kamo, S., Davis, D. W., de Wit, M. J. and Spooner, E. T. C. (1991): Field, geochemical and U-Pb isotopic constraints from hypabyssal felsic intrusions within the Barberton greenstone belt, South Africa: Implications for tectonics and the timing of gold mineralization. Precambrian Res. 49, 261-280.
- de Ronde, C. E. J., Spooner, E. T. C., de Wit, M. J. and Bray, C. J. (1992): Shear zone-related, Au quartz vein deposits in the Barberton Greenstone Belt, South Africa: Field and petrographic characteristics, fluid properties, and light stable isotope geochemistry. Econ. Geol., 87, 366-402.
- de Wit, M. J., Hart, R., Martin, A. and Abbott, P. (1982): Archean abiogenic and probable biogenic structures associated with mineralized vent systems and regional metasomatism, with implications for greenstone belt studies. Econ. Geol., 77, 1783-1802.
- Kamo, S. L. and Davis, D. W. (1991): A review of geochronology from the Barberton mountain land. In: Ashwal, L. D., (ed.), Two cratons and an orogen-excurtion guidebook and review articles for a field workshop through selected Archean terranes of Swaziland, South Africa and Zimbabwe: IGCP Proj. 280, 59-68.
- Kerrick, R. and Fyfe W. S. (1981): The gold carbonate association: Source of CO<sub>2</sub> fixation reactions in Archean lode deposits. Chem. Geol., 33, 265-294.
- Pepper, S. and du Plessis, E (1991): Princeton section, Agnes gold mine. In: Ashwal, L. D., (ed.), Two cratons and an orogen-excurtion guidebook and review articles for a field workshop through selected Archean terranes of Swaziland, South Africa and Zimbabwe: IGCP Proj. 280, 174-177.

---

WATANABE Koichiro and HAYASHI Shu (1994): Gold ore deposits in the Barberton Greenstone Belt, South Africa. —the 3.1 Ga mineralization—

---

〈受付：1994年1月31日〉