



まで移動し、その地を「南方より良い」という意味で“Phalaborwa”と名付けた。ここで、原始的な製錬および金属細工業が起り、今日まで存続することになった(Foskor, 1993)。

燐灰石の存在は、1906年に E. T. Mellor 博士によって初めて記載され、その後パラボラ地域にしばしば訪れた地質技術者によって開発が試みられた。ところが、その試みはことごとく失敗に終わり、以後30年の歳月が流れてしまう。そして、高名な地質技術者である Hans Merensky 博士が、1940年にバーミキュライトの鉱山開発を手がける一方で、多方面にわたる探鉱活動を行った結果、莫大な埋蔵量の燐酸塩が存在することを明らかにした。しかしながら、この当時でも依然として世界の経済的品位に達しないものであった。

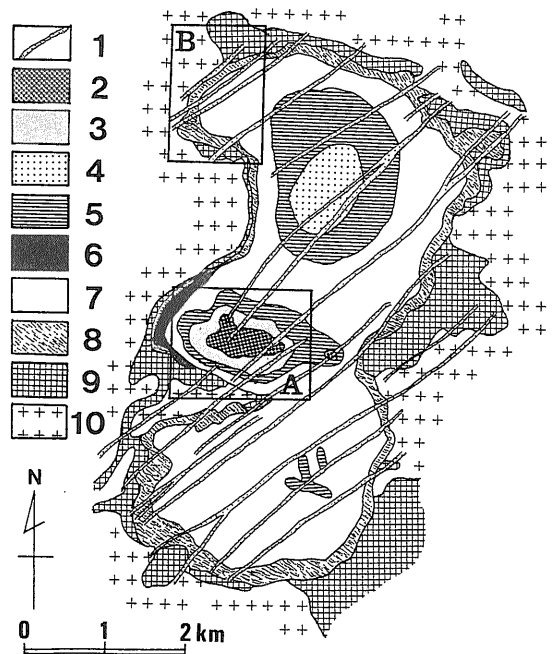
第二次世界大戦と1951年の朝鮮戦争の勃発の間に、南アでは輸入に頼っていた燐酸塩が不足し、国内の農業が大打撃を受けた。これを発端として、政府当局に国内燐酸塩産業設立の機運が高まり、有望な燐酸塩鉱床を保有するパラボラが脚光を浴びることになった(Foskor, 1993)。

### 3. 地質

#### 3.1 地質概要と構造発達史

パラボラのカーボナタイト複合岩体は、始生代の花崗岩類、片麻岩類などの分布域に、約20億年前に輝岩、閃長岩、超塩基性ペグマタイトおよびカーボナタイトが次々に貫入して形成されたものである。主要な複合岩体は、約16 km<sup>2</sup>の範囲に広がり、細長く、不規則な形状を呈する(第2図)。

最初の貫入活動は雲母質輝岩に始まった。その露出形態は腎臓形(ただし、断面で見るとパイプ状になっている)をしており、南北に約6 km、東西に約2.5 kmの広がりを持っている。次いで超塩基性ペグマタイトが、雲母質輝岩内の3ヶ所に貫入した。そのうち中央のものは、Loolekop 炭酸塩-フォスコライトパイプと呼ばれ、磁鉄鉱-かんらん石-燐灰石から成る「フォスコライト(phoscorite)」と「縞状カーボナタイト」を主体として、南北0.8 km、東西1.4 kmにわたる楕円状の形態を呈する(第3図)。このパイプは強い破碎作用を被っており、それによって生じた弱線部にカーボナタイト岩体の進入と、



第2図 パラボラ・カーボナタイト複合岩体の概略地質図(Lombaard et al., 1964)。黒枠で囲まれた部分 A は Loolekop 炭酸塩-フォスコライトパイプ、B は Foskor が所有する燐灰石の露天採掘場の位置を示している。  
1. 輝緑岩岩脈、2. カーボナタイト、3. フォスコライト、4. かんらん石-ひる石ペグマタイト、5. 輝石-ひる石-かんらん石ペグマタイト、6. 雲母岩、7. 輝岩、8. 長石質輝岩、9. 閃長岩、10. 古期花崗岩。

その活動に関係する炭酸塩の網状脈の発達が起こった。カーボナタイトの進入したゾーンは、さらに繰り返し破碎作用を受け、破碎部に沿って鉱化流体が移動して銅の硫化物を沈澱し、微細な割れ目を充填した(エヴァンズ, 1989)。

輝岩は、重力データによると少なくとも5 kmの深さまで連続していることが推定され(Hanekom et al., 1965)、カーボナタイトは Palabora Mining Co.(通称: PMC)が実施した試錐によって、深さ1,500 mまで確認されている(Eriksson, 1989)。

#### 3.2 輝岩(Clinopyroxenites)

輝岩は、主要複合岩体の約70%を占め、それらの成因はパラボラでの最も重要な地質上の問題点のひとつとなっている。この岩石は、通常、ペグマタイト様の塊状輝岩からグリメライト(燐灰石を伴う金雲母に富む岩石で、単斜輝石が25%以下のもの)まで変化する。構造・組織から判断すると、輝岩を

構成する単斜輝石、金雲母、燐灰石は、マグマから同時に初生鉱物として結晶化したものと考えられる (Eriksson, 1989; Erikson et al., 1985).

### 3.3 フォスコライト (Phoscorite)

かんらん石・燐灰石・磁鉄鉱などの粗粒な鉱物からなり炭酸塩鉱物を伴う岩石は、この地方ではフォスコライトと呼ばれ、Loolekopパイプに限って分布する(第3図)。Hanekom et al. (1965)によれば、この岩石の平均モード組成は、燐灰石25%、炭酸塩18%、磁鉄鉱35%、蛇紋石+かんらん石+雲母22%であるが、実際には鉱物の割合はかなり変化し、部分的には磁鉄鉱100%からかんらん石100%のものまで存在する (Eriksson, 1989)。

カーボナタイトは、フォスコライト中に不規則なパッチ状、レンズ状の形態を呈して分布する。これらは内部へ向かうほど大規模になり、その数量を増す (Eriksson, 1989)。

### 3.4 カーボナタイト

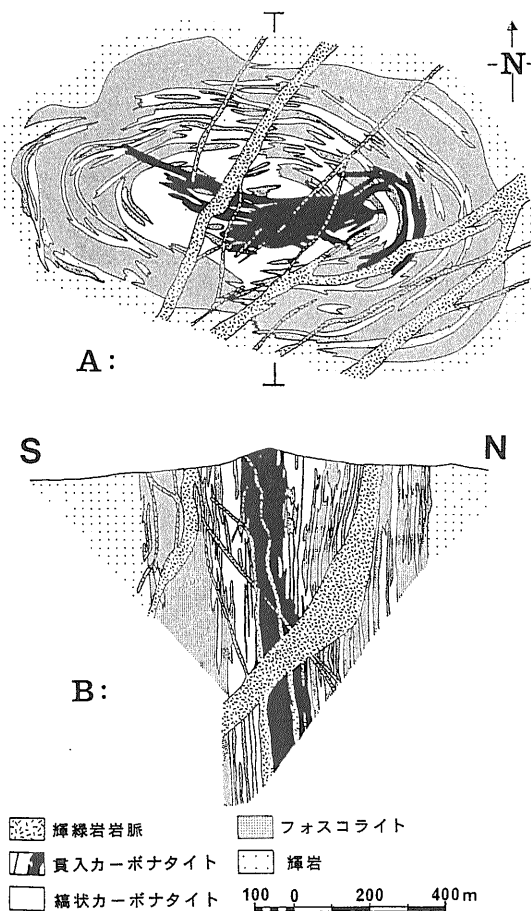
PMC(1976)によれば、カーボナタイトは大きく分けて2つの時期に形成された模様である(第3図)。前期の縞状カーボナタイトと呼ばれる磁鉄鉱に富むカーボナタイトは、楕円形のフォスコライトの濃集帯に存在する。縞状カーボナタイト中の方解石は、 $MgCO_3$ 成分を7.5%まで含有し (Lombaard et al., 1964)、一般にドロマイトの離溶ラメラを含んでいる (Van Rensburg, 1965)。

後期の貫入カーボナタイト (transgressive carbonatite) のメンバーは、中心部を占め、主として  $N70^\circ W$  と  $N70^\circ E$  方向の割れ目に沿って放射状に広がっている (第3図)。縞状カーボナタイトとフォスコライトおよび輝岩中には、貫入カーボナタイトの活動に起因する炭酸塩の細脈が一般的に見られる (Eriksson, 1989)。貫入カーボナタイトの炭酸塩は、縞状カーボナタイトのものよりマグネシウムに富み、 $MgCO_3$ 成分に換算して最高14%程度含まれる (Hennig-Michaeli, 1968)。貫入カーボナタイト中の主な硫化物は黄銅鉱で、斑銅鉱やキューバ鉱の離溶ラメラを含むこともある。

縞状カーボナタイトと貫入カーボナタイトの区別は、主として組織形態と硫化物の鉱物組成の差異に基づいている (Eriksson, 1989)。

### 3.5 その他の岩石類

主要複合岩体の周縁部には長石質輝岩や閃長岩な



第3図 主要複合岩体の中央部に位置するカーボナタイトを伴った地域 (Loolekopパイプ) を拡大した地質図(A) および南北断面図(B) (Verwoerd, 1986)。パラボラ銅鉱山の露天採掘場は、この地域内に存在する。

どが存在し、閃長岩においては主要複合岩体と別個の衛星岩体を形成するものも多い。

また複合岩体全体を切る様々なサイズの岩脈が存在する。これらは Hanekom et al. (1965) が記載した Karroo 輝緑岩 (dolerite) に相当し、古地磁気データによれば19億年前の活動年代を示している (Eriksson, 1989)。

## 4. 鉱床

パラボラ・カーボナタイト複合岩体は、世界各地で発見されている同種の岩体に比べると、銅硫化物、磁鉄鉱、バデレアイト ( $ZrO_2$ )、燐灰石、ウラン鉱物、およびパーミキュライトなど多くの種類の

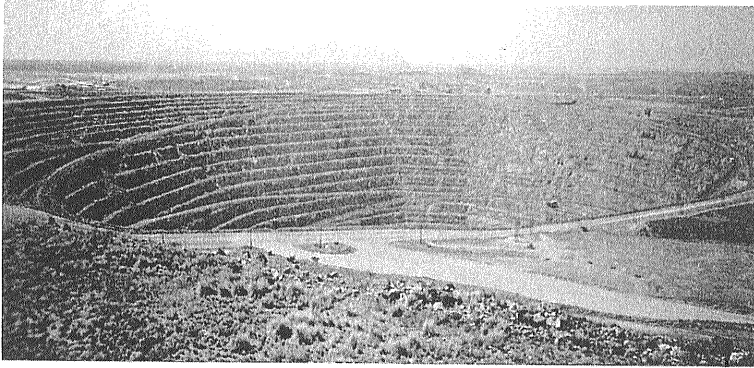


写真1

1993年現在のバラボラ銅鉱山の露天採掘場。最大直径：約1.9 km，地表からの深さ：約800 m。

鉱物を産出するという特徴がある。

バラボラには、銅・バーミキュライト・燐灰石をそれぞれ対象とした三つの露天採掘場があり、銅鉱床とバーミキュライト鉱床がPMCによって、燐灰石鉱床がPhosphate Development Corp.(通称：Foskor)によって開発されている。

#### 4.1 銅

Loolekop 炭酸塩-フォスコライトパイプの分布域では、PMCが主に銅を対象にカーボナタイトおよびフォスコライトの採掘を行っており、副産物として磁鉄鉱・燐灰石・金・銀・白金族元素・バデレライト( $ZrO_2$ )・ウラン・ニッケル硫酸塩および硫酸なども回収している(第3図)。1965年に粗鉱Cu品位0.71%，生産量1,327万トン/年の規模で操業を開始し、1992年現在、埋蔵鉱量4.6億トン、粗鉱Cu品位0.6%，生産量2,900万トン/年の規模となった(CRU, 1993)。銅鉱化作用が認められるカーボナタイトは世界各地に知られているが、実際に銅を商業的に生産し、その規模が斑岩銅鉱床に匹敵するのはこの鉱山のみである。現在の露天採掘場の規模は、最大径：約1.9 km，地表からの深さ：約800～900 mである(写真1，口絵参照)。

#### 4.2 銅鉱石の副産物

**磁鉄鉱：**磁鉄鉱は銅鉱体全体の重量比の約25%を占め、特にフォスコライトでは最高50%以上になる場合もある。バラボラの磁鉄鉱はチタンに富み、その $TiO_2$ 含有量はLoolekopパイプの中心から外側へ向かうほど増加し、貫入カーボナタイトでは0.1%よりも少なく、縞状カーボナタイトで0.1～1%，フォスコライトでは約4%に及ぶ。1966年から1977年までの間、チタン含有量の低い磁鉄鉱(Fe：66%， $TiO_2$ ：1%)が製鉄用として約850万ト

ン程日本へ輸出されたこともある(Verwoerd, 1986)。

**硫酸：**硫黄を含有する製錬所の排ガスを除去するために1966年に硫酸プラントが、1975年にガス洗浄プラントが建設された。現在、これらは二重の効果を発揮している。そのひとつはガス洗浄設備においてバレリー鉱を浮選し、銅の追加回収を可能にしていること、もうひとつは重要な副産物として硫酸を肥料生産者へ供給していることである(Verwoerd, 1986)。

**ジルコニウム：**ジルコニウムの主要鉱物であるバデレライト( $ZrO_2$ )は、主としてフォスコライトの副成分鉱物として含まれる。PMCでは、この鉱物を湿式磁選による磁鉄鉱除去後の銅の浮選廃滓から比重選鉱により回収している。製品は非常に高純度(最高(Zr, Hf) $O_2$ ：99%でHf：約0.5%を含有する)で、ブラジルから得られている不純物を多く含むものと比べると、かなり品質の良いものと云える。用途としては、研磨剤・耐火物・カラーセラミックスタイルなどがあり、最近ではジェットエンジンや内燃エンジンにおける耐熱材の原料としても使用されている。バデレライトは、Foskorでも燐灰石の廃滓から回収されている(Verwoerd, 1986)。

**ウラン：**貫入カーボナタイトは、副成分鉱物としてウラン鉱物(uranothorianite)を含んでいる。この鉱物はバデレライトとともに重鉱物として回収され、ウラン酸化物に加工される(Verwoerd, 1986)。

**その他の副産物：**1979年以来、金・銀・白金族元素は、銅に次いでPMCの収益に貢献している。これらの金属は鉱石中に微量に存在し、製錬所の電解スライムから回収される。また、ニッケルが銅精鉱中に主に含ニッケル硫化物の形で存在し、ニッケ



写真2 パラボラ銅鉱山の北北西にある Foskor の所有する燐灰石の露天採掘場(Northern Pyroxinite Pit).

ル硫酸塩の水和物として生産されている (Verwoerd, 1986).

#### 4.3 燐酸塩

燐灰石に富む輝岩を採掘している Foskor の露天採掘場は、PMC の銅鉱床から北北西に約 3 km 離れた所に位置する (第 2 図, 写真 2)。この輝岩は、世界最大のマグマ成燐酸塩鉱床を形成し、採掘場は輝岩のごく一部をカバーするに過ぎないが、その付近だけの鉱量でも燐灰石精鉱 ( $P_2O_5$ : 36.5%) に換算して 30 億トンと言われている (エヴァンズ, 1989)。

燐灰石精鉱の生産は、1955年に国内肥料産業への安定供給を目的として、年産6万トンという小規模な形で始まった。その後1969年まで着実に生産量が増加し、国内需要のほぼ全量をパラボラから供給するまでになった (Fourie and Dejager, 1986; Foskor, 1993)。鉱石は燐灰石を 10~25% 含む輝岩であるが、PMC から Foskor に供給されるフォスコライト起源の燐酸塩に富む廃石も重要な鉱石となっている。現在、年間約 2 千万トンの粗鉱が破碎・浮選過程を経て (写真 3)、 $P_2O_5$  で 36.5% の濃縮産物として約 350 万トン回収されている (Verwoerd, 1986; Foskor, 1993 から推定)。

#### 4.4 バーミキュライト (蛭石-vermiculite)

バーミキュライトは、加熱すると膨張する雲母質鉱物に与えられた名称である。バーミキュライトの利用の歴史は比較的新しく、戦後アメリカにおいて建材として使われたのが最初である。焼成バーミキュライトは極めて軽量で、熱と音に対して優れた性能を発揮することから、その主な用途は軽量骨材、耐熱材、保温材、防音・吸音材などの原料に用いら

れる。パラボラは西欧の諸国をはじめ世界各国にこのバーミキュライトを輸出しており、特に日本における最大の供給地となっている (吉田, 1992)。

バーミキュライトの露天採掘場は、銅鉱山から北北東に 2 km 離れたところに位置する。生産は 1946 年から連続して行われ、1983 年現在、PMC によりバーミキュライト 90% の製品が年間およそ 18 万トン生産されている (PMC, 1976)。

パラボラのバーミキュライトは金雲母の変質物であり、地下水の循環によって地表から約 50 m の深さまでの部分が変質して、鉱床を形成している。しかしながら一部では、金雲母のバーミキュライト化作用が深度 400 m まで確認されている。

## 5. おわりに

今回の巡検で、我々が直接見学できたのは、PMC が採掘しているカーボナタイト本体の鉱床 (写真 1) ではなく、Foskor が所有する燐灰石に富む輝岩の露天採掘場 (写真 2) とその精製プラント (写真 3) であった。ここでは、燐灰石が浮選過程を経て、 $P_2O_5$  で 40% 近くまでに濃縮されており、驚くほど大規模に操業されていた。現在、海洋堆積性起源の燐酸塩が燐の主要供給源となっているが、これらが最近世界的に枯渇してきている。したがって、この世界最大のマグマ成燐酸塩鉱床が、将来的にますます注目を集めるものと思われる。

丘の上から眺めたパラボラ銅鉱山の露天採掘場の雄大さは今も脳裏に焼き付いており、大きな感動を覚えた。この鉱山から採掘された様々の鉱物資源により南アはおろか、世界中の人々はその恩恵を受け

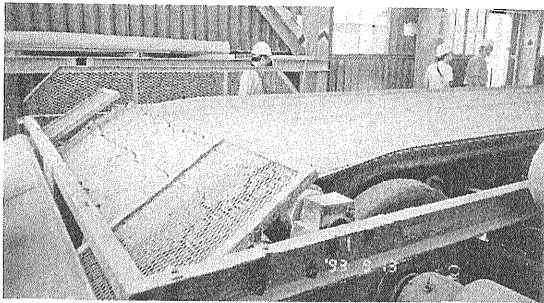


写真3 ベルト・フィルターに乗っている燐灰石の濃縮産物( $P_2O_5$ : 36.5%)。

てきたのである。しかしながら、その採掘場の大きさ、その深さは、「人間はどこまで資源を掘り続けるのだろうか?」という素朴な疑問を改めて私に投げかけたような気もする。

パラボラだけではなく、今回の南ア巡検で回ったすべての鉱山が、鉱床学に携わってきた私には夢のフィールドであり、この巡検自体がドリーム旅行であった……。

最後に、本稿の作成に当たっては、地質調査所の神谷雅晴氏に貴重なご助言並びにご協力を賜った。また、この南ア地質・鉱床巡検ではコーネル・デロンダ氏や浦辺徹郎氏をはじめとする巡検メンバーの方々に大変お世話になった。以上の方々に厚くお礼申し上げる。

文 献

Eriksson, S. C. (1989): Phalaborwa: a saga of magmatism, metasomatism and miscibility. In; CARBONATITES Genesis and Evolution, (ed.) Keith Bell, London UNWIN HYMAN, 221-254.

エヴァンズ, A. M. (1989): カーボナタイト-アルカリ火成岩鉱石環境. 三宅輝海訳, 鉱床地質学序説, 山羊社, 138-145.

Foskor(1993): Phosphate Development Corporation Ltd. (Foskor)の会社案内(英文).

Fourie, P. J. and DeJager, D. H. (1986): Phosphate in the Phalaborwa Complex. In; Mineral Deposits of Southern Africa, 2239-2253.

Kamitani, M. and Hirano, H. (1990): Important carbonatite-alkaline/alkaline complexes and related mineral resources in the world. Bull. Geol. Surv. Japan, 41, 631-640.

Lombaard, A. F., Ward-Able, N. M. and Bruce, R. W. (1964): The exploration and main geological features of the copper deposit in carbonatite at Loolekop, Palabora complex. The geology of some ore deposits of southern Africa, 2, Geol. Soc. South Africa, (ed.) S. H. Haughton, 315-337.

Palabora Mining Company Limited, Mine Geological and Mineralogical Staff (1976): The geology and the economic deposits of copper, iron, and vermiculite in the Palabora Igneous Complex: A brief review. Economic Geology 71, 177-192.

武内寿久禰(1973): カーボナタイト鉱床(I), (カナダ・南アフリカ・マラウイのカーボナタイト). 鉱山地質, 23, 367-382.

Verwoerd, W. J. (1986): Mineral deposits associated with carbonatites and alkaline rocks. In; Mineral Deposits of Southern Africa, 2173-2191.

吉田國夫(1992): 鉱産物の知識と取引. 通商産業調査会, 丸善社, 310-315.

---

FURUNO Masanori (1993): Phalaborwa Carbonatites and Mineral Deposits.

---

<受付: 1994年1月7日>