

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

石原 舜 三¹⁾

1. まえがき

我が国のような若い火山活動が見られる島弧ではエピサーマル(浅熱水性)金鉱床がよく知られているが, 大陸地域の古い堆積-変成岩地域には, 古くはメソサーマル(中熱水性)ゴールド, 最近ではオロジェニック ゴールド(oro-genic gold, Groves *et al.*, 1998)と呼ばれている一群の金鉱床がある。これには, 以前に紹介したカリフォルニアのマザーロード(石原, 1986)のような金石英脈から, ウズベキスタンのムルンタウ鉱床(石原, 2000)のような堆積岩地帯の破碎岩石中に鉱染するもの, ここに紹介する先カンブリア紀の縞状鉄鉱層(BIF: Banded Iron

Formation)に胚胎するものなど, 幅広い性格のものが含まれている。一般にエピサーマルよりも高温生成と考えられており, 古い地質時代に多く産出する。

地質時代の金産出量には新生代と先カンブリア時代に2つのピークがあり, 日本列島は前者に属する。他方, 先カンブリア時代の金はオロジェニック金鉱床から得られている。この時代の金鉱床は縞状鉄鉱層や超苦鉄質~苦鉄質火山岩類と密接に関連して産出することが多く, 金はこれらの岩石との成因な関係が推定されている。

かつて南アフリカに滞在中に, 私のホストであったウィットウォーターズランド大学のカール・アンホイザー教授は「バーバトン地域では金鉱床の近傍に



写真1 山間に広がるオウロプレトの全景。教会が23ある。

1) 産総研 特別顧問

キーワード: ブラジル, 始生代, 縞状鉄鉱層(BIF), 金鉱床, As含有黄鉄鉱, 磁硫鉄鉱, 硫砒鉄鉱



写真2 オウロプレトの中心街。



写真4 オウロプレト、石の彫刻品が多い土産店。



写真3 オウロプレト、坂道に面する民家。



写真5 オウロプレト、街で会った元気な高校生旅行団。

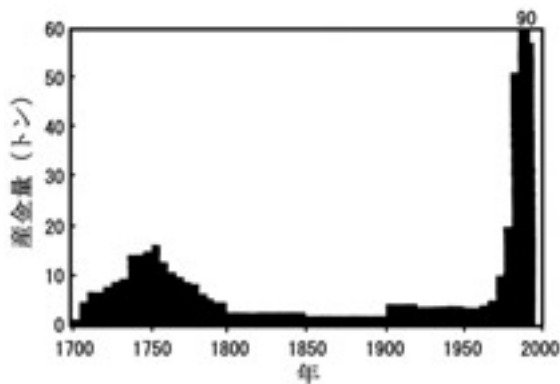
常に縞状鉄鉱層が現れるので、自分は縞状鉄鉱層に一次濃集していた金が後生的な熱水循環で破砕帯などに二次濃集をして金鉱床を形成したと考える」と話しておられた。1993年の有志による南ア巡検(本誌479号参照)で私達は一部の金鉱床を見学したが(渡辺・林, 1994), 縞状鉄鉱層との関係はよくわからなかった。

第31回万国地質学会議(IGC)は2000年8月6日～17日にブラジルのリオデジャネイロで開かれたが、その付属巡検に縞状鉄鉱層と非常に密接に関連した産状を示す金鉱床をみせるという案内が出された。出発点はリオデジャネイロからジェット機で約1時間北に飛んだペロオリゾンテであり、便利な所であったので、早速参加することにした。偶然にも東京大学の正路徹也教授と一緒にであった。この小文は8月18日～8月23日にガイドブック(Lobato *et al.*, 2000; Pereira *et al.*, 2000)および配布資料(Ribeiro-Rodrigues, 1998)に従って現地で見聞したものの記録である。なおこの巡検用に用意され

た研究と資料は、後にLobato *et al.* (2001a, b)で正式に公表されている。

2. 黒い金の街、オウロプレト

巡検地域はミナスジェイラス州中央南部に位置し、“鉄のコードラングル”(Quadrilatero Ferrifero, 以下QFと略称する)と呼ばれる縞状鉄鉱層の濃集地帯である。私達は初日にオウロプレト(Ouro Preto, 黒い金)を訪れた。ミナスジェイラス州の首都、ペロオリゾンテ(人口200万人)から約100km、車で2時間の距離にある。この町はその名の通り1698年の砂金の発見で人々が集まり、後に山金を発見して金鉱業で栄えた町である。当地の砂金はパラジウム(Pd)が含まれるために黒ずんで見え、オウロプレトと呼ばれたと聞く(L. M. Lobato, 私信)。1711年～1895年にミナスジェイラス州の首都が置かれた。家々は山間の谷間に広がり、斜面に適合した家屋を造っている(写真1-5)。ポルトガル



第1図 ブラジルの年代別金生産量 (Ribeiro-Rodrigues, 1998).

由来のバロック風の見事な教会 (口絵2) が多く、その数は23にも達するとの説明であった。

QF地域の金は最初砂金から採取され、その量は400トン以上と推定されている。その他ラテライト中の金粒も若干採集されている。それが1750年頃にブラジルの産金量の最初のピークをもたらした (第1図)。

第2のピークは“山金”から得られる現代であり、その供給源は始生代の破碎帯型鉱床からの571トン、原生代の同種鉱床からの92トンである。QF地域の歴代の総産金量は1,000トンを超え、ブラジル全体の約40%を占める。QF地域の主力はノヴァリマ層群の鉱床であり、最大はモロヴェロ鉱山で (第2図のI)、総生産量は470トン、採掘深度2,500mに達している。ついでクイアバ鉱山が大きく、総金量は予想鉱量を含めると300トン級と言われている。

3. 地質概況

南アメリカ大陸には北部に最も古いアマゾン地塊があり、これはCA (中央アマゾン)、MI (マロニーイタカイウナス)、VT (ヴェンツリータバジョス)、RNJ (リオネグロージュレナ)、RO (ロンドニア-サンイゲナシオ)、SS (スンサス) などの地質構造区に分けられている (Cordani et al., 2000)。このほか小地塊としてサンルイス、サンフランシスコ、ルイズアルヴェス、リオデラプラタなどがある (第2図)。

QF地域はその名のごとく、ブラジルにおける最大の鉄鉱産地でもある。この地域の構成岩類は古い方から始生代の片麻状トナル岩類、始生代のリ



第2図 南アメリカの構造区分 (Cordani et al., 2000)。

- I 南アメリカ プラットフォーム
- II パタゴニア マッシューフ
- III アンデス帯と先カンブリア基盤 (黒色部)
- IV 前陸盆地

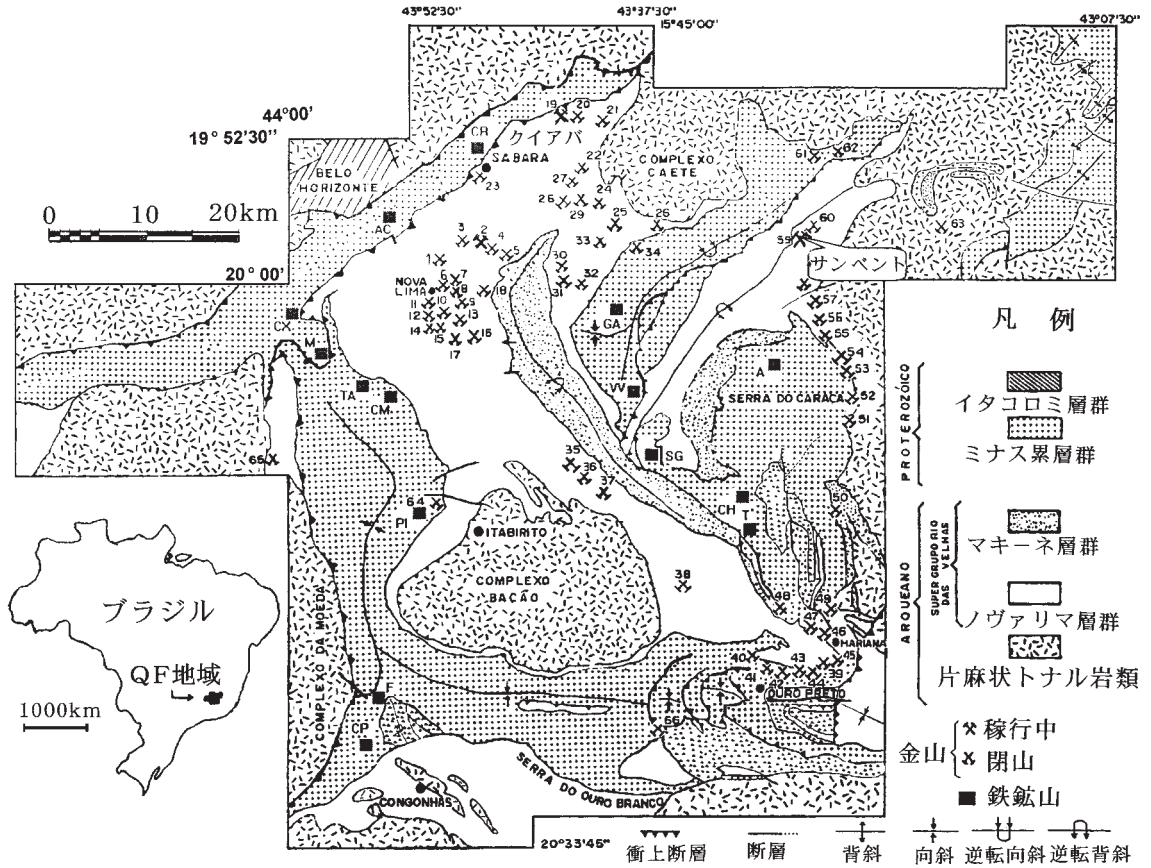
オダスヴェルハス累層群、そして原生代の諸岩石からなる (第3図)。

3.1 始生代片麻状トナル岩と同質片麻岩類 (>29億年)

これらはQF地域の基盤の大部分を構成する。そのジルコン年代は33.8-29.0億年である。サンフランシスコ地塊の南域に付加した火成岩類と考えられ、関連する花崗岩活動の最末期はカムボペロ複合体 (2,920-2,900Ma) の形成である。この片麻岩類地域には金鉱床は知られていない。

3.2 始生代リオダスヴェルハス累層群 (27.8億年-26.6億年)

この地層は鉱物資源探査の見地からは最も重要なものである。この地層はQF地域に広く分布し、



第3図 QF地域の地質図と金鉱床の分布 (Ribeiro-Rodrigues, 1998). 19がクイアバ鉱床, 59がサンベント鉱床.

始生代と原生代初期と中期の変形作用を蒙っている。この始生代の地層は更に次の下位ノヴァリマ層群と上位のマキーネ層群に大別される。

(イ)ノヴァリマ層群

これは最下位から、(a)超苦鉄質-苦鉄質火山岩類(写真6)、(b)火山岩類と碎屑岩~化学沈殿堆積岩類、(c)火山碎屑岩類、(d)再生堆積岩類に分けられる。火山岩類は主にコマチアイト、ソレアイト溶岩流、これに少量の斑れい岩、アノソサイト、かんらん岩も附随する。変成縞状鉄鉱層、含鉄チャート、火山碎屑岩、炭酸塩片岩なども伴われる。かんらん岩質コマチアイトは塊状、枕状(写真7)、角礫状などで、スピニフェックス組織(写真8)などの急冷組織を持つ。

ノヴァリマ層の縞状鉄鉱層は鉄に富むチャートで薄く挟み、厚さ50m以下、その鉄鉱物は菱鉄鉱と磁鉄鉱である。全鉄含有量はラポソス鉱床で8.5-29.0重量%、サンベントス鉱床で25-51重量%、ク



写真6 苦鉄質火山岩起源変成岩で作った城壁。

イアバ鉱床で6.5-23.0重量%である。これら縞状鉄鉱層が硫化鉱物化したり、珪酸塩鉱物化することがあるが、これらは鉱化・変質作用の結果である。

(ロ)マキーネ層群

これは下部が沿岸堆積岩類で、現在はリップマークを伴う雲母珪質片岩類、斜層理を伴う珪質



写真7 枕状構造を持つ玄武岩.



写真8 コマチアイトのスピニフェックス組織.

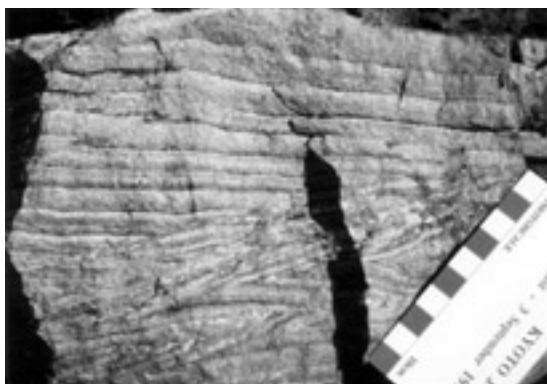


写真9 砂漠の堆積物起源と思われる斜層理の化石. ラボソス付近.

片岩類(写真9)などの変成岩類に変化している. 上位層は陸成の礫岩, 珪質砂岩類である. 以上を不整合に覆って原生代の諸岩石が分布する.

3.3 原生界 (<26.6億年)と構造運動

ミナス累層群は原生代前期と推定されている.

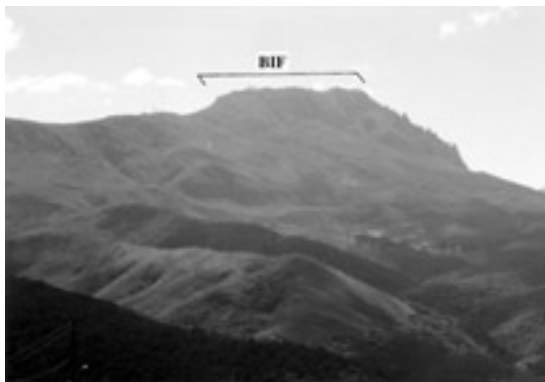


写真10 地形的に突出した縞状鉄鉱層(BIF). 右に緩く傾斜する層理面に注目.



写真11 ラボソス鉱山の露天ビット.

これは大陸縁堆積物起源と思われ, スペリオール湖型の縞状鉄鉱層を伴うことで著名であり, イタビライトとして私達の学生時代に教わったものである. 縞状鉄鉱層は地形的にも現れている(写真10). 現地での説明ではFe45%, チャート55%の低品位鉄で二次富化部分が稼行されるとのことであった. これは更に基底部の碎屑岩からなるカラシャ統, その上位の化学沈殿岩類からなるイタビラ統, 上部の碎屑岩類からなるピラシカバ統, 最上位の泥質岩, 凝灰岩からなるサバラ統に分けられる.

ミナス累層群の上位には大陸性堆積物からなる原生代のイタコロミ層群, 海成堆積物からなるエスピナシオ累層群が分布する.

この地域の構造運動の最古のものは基盤のトナル岩類とリオダスヴェルハス累層群が受けた圧縮応力である. これは北から南または南西への圧縮により, 東北東-南南西走向の褶曲構造をもたらした. 金鉱化作用は熱水変質作用と共に, この変形期のプリトルーダクタイト構造に沿ってみられ, 次の



写真12 イタピライト鉄鉱石，ラボソス鉱山。



写真14 山間のガラシャ修道院。ここに一時泊した。



写真13 露頭見学中，リーダーの足に付いたダニをとる参加者達。

5種類に分類される。(1)ミロナイト化断層面と破砕面，(2)褶曲軸に沿った劈開面か非対称褶曲の片理面，(3)褶曲ヒンデ間の内部割れ目，(4)広間隔割れ目内の劈開，(5)角礫化部分など。これらはQF地域の褶曲運動の最初の時期に形成されたものと思われている。

4. モロ ヴェロ鉱床

モロ ヴェロ鉱山はベロ オリゾンテ南東10km，ノヴァ リマの町にあって，1810年から生産されており，古くて大きいブラジル最大の金山である。1997年には坑内掘りが深度2,450m(27レベル)に達し，閉山に至った。Vieira *et al.* (1991)によると鉱量5,706,160トン(9.35g/t Au)，金量53.4トンが残存している。

この鉱床は“lapa seca”を母岩とすることで有名である(Vieira *et al.*, 1991)。Lapa secaなる用語

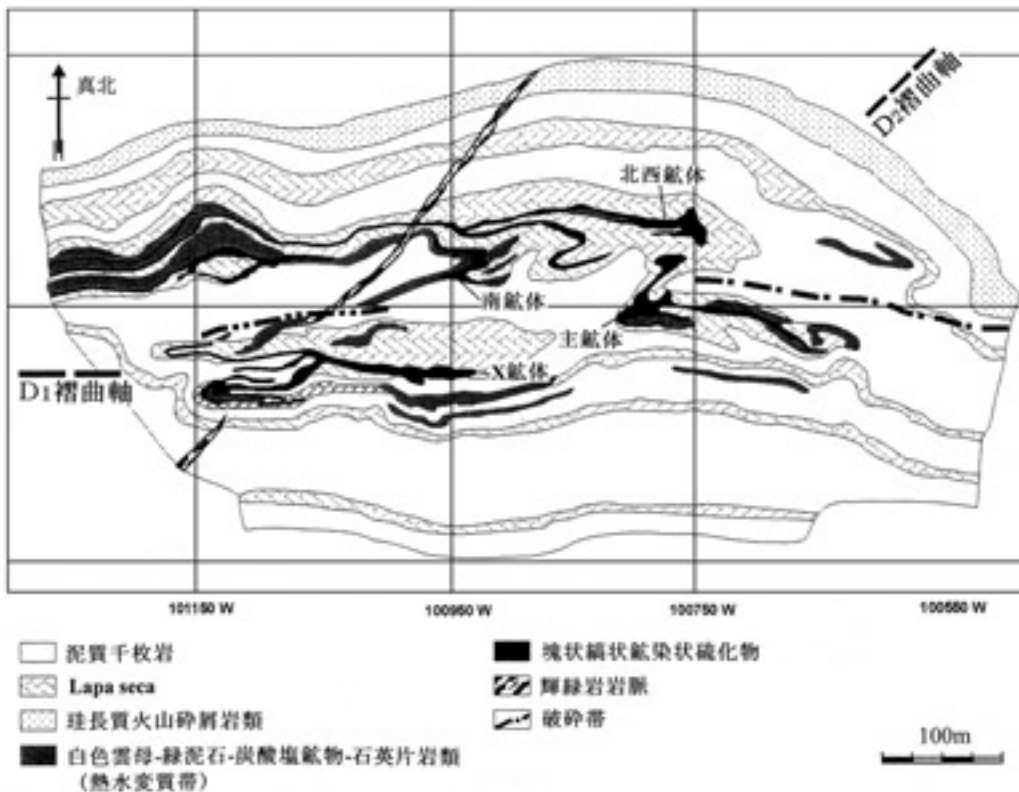
は最初鉱夫によって使われ，文字通りには“乾いた下盤”を意味する。外観は灰～ベージュ色ないしは白色，細～粗粒，片状～塊状の熱水変質岩で，主に炭酸塩鉱物(鉄ドロマイト±アンケライト，菱鉄鉱，ドロマイト，稀に方解石)，石英，アルバイト，少量の白雲母を含む。この岩石は，一時期，化学沈澱堆積岩と考えられたこともあったが，現在では熱水変質岩としての証拠が固まっている(Lobato *et al.*, 2001a)。

Lapa secaはモロ ヴェロ(金量450トン以上)，ピカルホ(金量2トン以下)，ベラ ファマ(金量0.5トン以上)などの金山で重要な母岩を形成する。Lapa secaの地表露頭は，幅3～100m，平均30mで，走向方向に14km追跡できる。

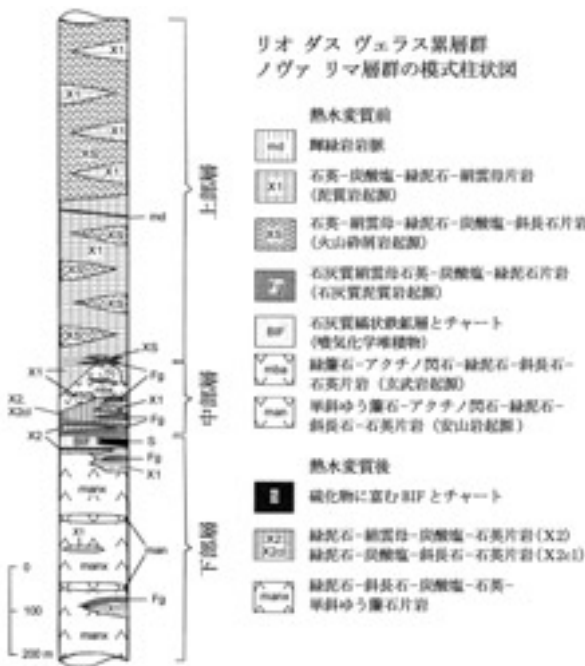
モロ ヴェロ鉱床付近の構成岩類はlapa secaを挟んで，スピライト化ソレイト質玄武岩類，珪長質凝灰岩類，千枚岩類などが分布する。鉱体はlapa secaに挟まれ白色雲母-緑泥石-炭酸塩鉱物-石英片岩および塊状-縞状-鉱染状-硫化物層とのパッケージとして産出する。

これら母岩は著しく褶曲しており，その活動はD₁，D₂，D₃の3時期に分けられる。D₁期は東西走向の等斜褶曲で，急角度の傾斜を持つ。D₂期は同じく等斜褶曲であるが，東北東系の褶曲軸を持ち，D₁期褶曲に重複して，これを消滅させる。両者の交差部には主鉱体，南鉱体，北西鉱体などの主要鉱体が胚胎する(第4図)。D₃期の褶曲はN-S走向，E傾斜で，小規模なものである(Vieira *et al.*, 1991)。

金富鉱部はlapa seca中の硫化鉱物層と密接である。Lapa secaはここでは層厚0.5～5m，褶曲で



第4図 モロ ヴェロ鉱山, ミナ グランデ鉱床の25レベル地質図 (Lobato et al., 2001b).

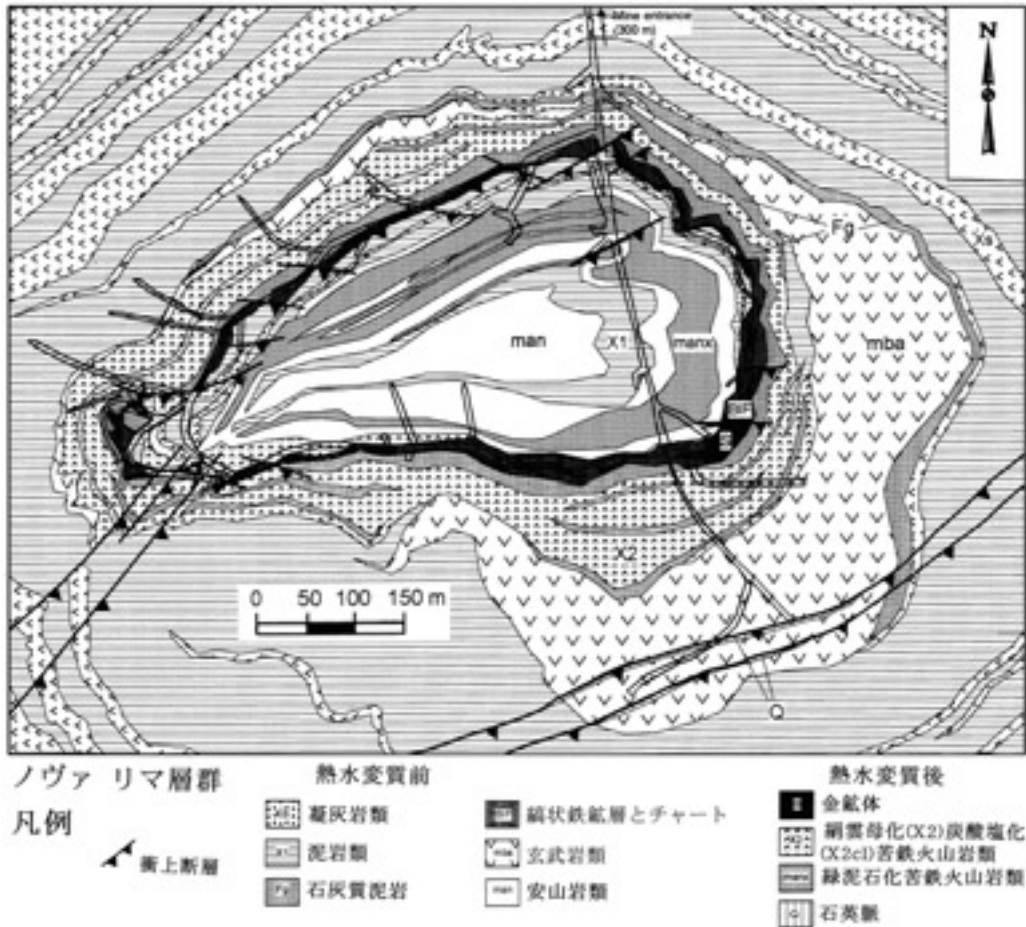


第5図 クイアバ鉱床付近のノヴァ リマ層群の模式断面図 (Ribeiro-Rodrigues, 1998).

折り畳まれた部分では10mに拡大する。硫化物鉱体の60-75容量%は磁硫鉄鉱である。ついで硫砒鉄鉱が多い。黄鉄鉱は3-12容量%に過ぎないが、金富鉱部と密接である。磁硫鉄鉱/黄鉄鉱比は深部へ向かうにつれて上昇する。自然金は粒径1~10 μm, 磁硫鉄鉱の鉱物境界沿いに産するか、黄鉄鉱, 硫砒鉄鉱に包有される。Au/Agは5と低い。硫化物鉱体のほか、金は炭酸塩鉱物+黒雲母>緑泥石変質岩にも含まれるが、この産状の量は全体の20%以下である。

5. クイアバ鉱床

この鉱床付近には、リオ ダス ヴェラス累層群に属するノヴァ リマ層群が分布し、著しい褶曲を受ける。この層群は3層に分けられ、下部層は主に安山岩類、その上に縞状鉄鉱層、チャートなどの化学沈殿岩と玄武岩からなる中部層、その上位は泥質岩に中性~珪質火砕岩が混在する上部層である(第5図)。



第6図 クイアバ鉱山，3坑レベルの地質図 (Ribeiro-Rodrigues, 1998).

鉱床はノヴァ リマ鉱床層群の諸岩石が南東に急斜する鞘袋状に落ち込む褶曲が著しい部分に発達する(第6図)。この楕円筒状の鉱筒は、3,000m 下部まで追跡でき、3レベルでは直径600mであるが、17レベルでは800mと、下部で大きくなる。

鉱床の母岩は安山岩類、玄武岩類、縞状鉄鉱層とチャート、石灰質泥岩類、泥岩類、凝灰岩類の互層であり、これらが緑色片岩相の変成作用を受け、局部的にはミロナイト化も見られる。熱水変質作用としては原岩が苦鉄質岩の場合に緑泥石化が顕著で、さらに絹雲母化・炭酸塩化が認められる。一部に石英脈が見られる(第6図)。

金鉱化作用は、(1) 縞状鉄鉱層中か、縞状鉄鉱層の硫化物に富む層準に見られ、(2) 一部が苦鉄火山岩類や堆積岩中の破碎帯に沿って見られる。また、(3) 一部に含金石英脈がある(例 Viana 鉱体)

が、その規模は小さい。稼行鉱体は12であり、その厚さは数cmから15mに及ぶ。最大の鉱体はクイアバ褶曲の南東末端部にある。

鉱体に近づくにつれてグラファイト含有菱鉄鉱(土アンケライト)縞状鉄鉱層が炭酸塩化変質により白色化し、多量のアンケライトや鉄ドロマイト、少量の方解石を含むようになる。白色化はグラファイトの消滅と炭酸塩化によるためである。鉱体に富化された成分はS, Au, As, CaO, Cuなどである(Ribeiro-Rodrigues, 1998)。黄鉄鉱が含鉄炭酸塩鉱物を交代し、黄鉄鉱薄層・透明暗色の石英-炭酸塩鉱物薄層・チャート薄層の互層からなる典型的な縞状鉄鉱石を形成する。

金は硫化物層に含まれており、硫化物化と密接である。硫化物層の厚さは数mmから1m(写真15)、母岩の片理面と一般には平行し、斜交することもあ



写真15 クイアバ鉱山9レベルの高品位硫化鉱.



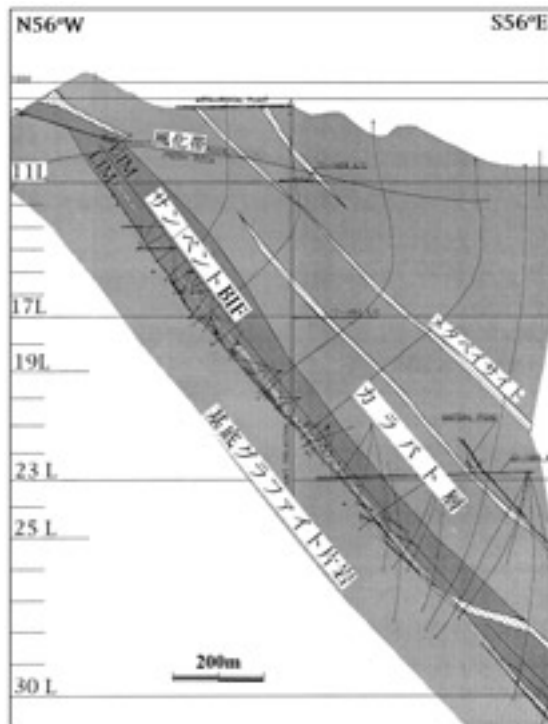
写真16 サンベント鉱山全景. 鉱山資料より.

る(口絵5参照). この鉱体は石英脈や方解石脈に切られる. 高品位の塊状硫化物鉱体は変形や破碎が著しい部分に見られる. 等斜褶曲の蝶番部分は探査上要注意である. 塊状鉱体の中心には磁硫鉄鉱が産出する.

金は粒径3-60 μm , 割目中の独立包有物, 構成鉱物の粒間, 黄鉄鉱の外核として産出する. Au/Ag比は6である. 金を伴う黄鉄鉱はAsを含むことが多く(平均1.9重量%As), また金は硫砒鉄鉱(1-3容量%)にも伴われる. 硫砒鉄鉱温度計によって, 金の生成温度は270-300°Cと見積もられている. 時期的には最早期の微粒黄鉄鉱と最末期の磁硫鉄鉱のステージでは金は晶出していない.

6. サンベント鉱床

この鉱床はQF地域の北東部にあり, サンタバーバラに近い(第3図, 写真16). 確定鉱量は300万吨, 平均金品位9g/t, 金量にして27トンである.



第7図 サンベント鉱床の北西-南東地質断面図 (Pereira et al., 2000).

本鉱床付近には碎屑性と化学沈殿堆積岩類の発達が著しい. これら堆積岩類は下位から上位に, 下部鉄鉱層, 基底炭質層, サンベント鉄鉱層, カラパト層に分類される(第7図).

サンベント鉄鉱層は, 黄鉄鉱ノジュールを含むグラファイトに富む緑泥石-炭酸塩片岩を覆う. 鉱床母岩はこの鉄鉱層のみと言ってよく, 他にはグラファイト片岩が局部的に金を含むことがある.

サンベント鉄鉱層は暗色の硫化物(土グラファイト)を含む磁鉄鉱薄層と緑色の緑泥石-スティルプロメレーン薄層, クリームピンクの菱鉄鉱-石英(土絹雲母)薄層の互層からなる. 鉱石としては, (1)硫化物含有石英脈と(2)鉄鉱層中の細粒硫化物ラミナ鉱石, の2種類がある. 前者は鉄鉱層の縞状構造と平行であるか, または斜交する. 鉱化はリニエーションの規制を受けていることから, 走向横ずれ運動に伴って生じたものと考えられる.

鉱石及び代表的母岩の化学成分を第1表に示す. 鉱石はAs, AuとSに富むことが明らかで, AuはAs, Sとの相関性が著しい. 硫化物では磁硫鉄鉱が最も多く, かつ最早期の晶出鉱物で, 時に黄

第1表 サン ベント鉱床の母岩と鉱体の化学成分 (Pereira et al., 2000).

	鉱体	BIF	グラファイト片岩
SiO ₂ %	50.64	42.24	58.10
TiO ₂	0.07	0.02	0.57
Al ₂ O ₃	1.06	0.64	14.80
Fe ₂ O ₃	12.50	18.34	1.50
FeO	14.14	21.52	6.00
MnO	0.12	0.08	0.14
MgO	1.52	1.74	3.80
CaO	1.53	2.60	2.80
Na ₂ O	0.28	0.02	2.40
K ₂ O	0.16	0.03	1.90
P ₂ O ₅	0.06	0.12	0.05
CO ₂	8.35	11.82	5.90
S	3.96	0.10	0.09
V ppm	22	L10	130
Cr	68	79	370
Co	16	21	33
Ni	30	26	196
Cu	23	9	28
Zn	92	89	289
As	34846	61	577
Se	1	1	2
Rb	10	8	69
Sr	34	31	120
Y	6	L5	19
Zr	30	27	120
Ba	35	L15	290
W	65	L3	L3
Au	19.92	0.26	<0.05
Pb	62	53	32

鉄鉱の包有物を含む硫磁鉄鉱も多量に産する。これら硫化物は硫黄フェガシティ上昇時に原岩の磁鉄鉱、菱鉄鉱を分解して生成したものである。

磁硫鉄鉱と黄鉄鉱とは負の相関性を持つ。磁硫鉄鉱量は21レベル以下の深部、かつ褶曲作用が密な部分で上昇する。肉眼的に見える金粒は磁硫鉄

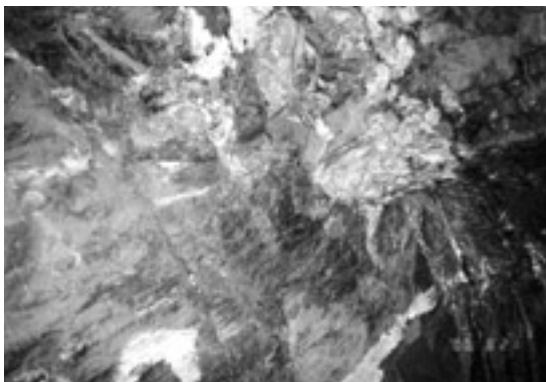
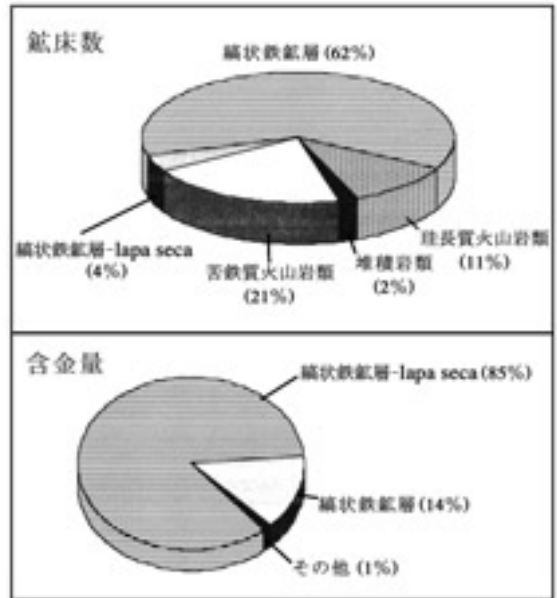


写真17 サン ベント鉱山24レベル。最末期の黄鉄鉱-石英プール。



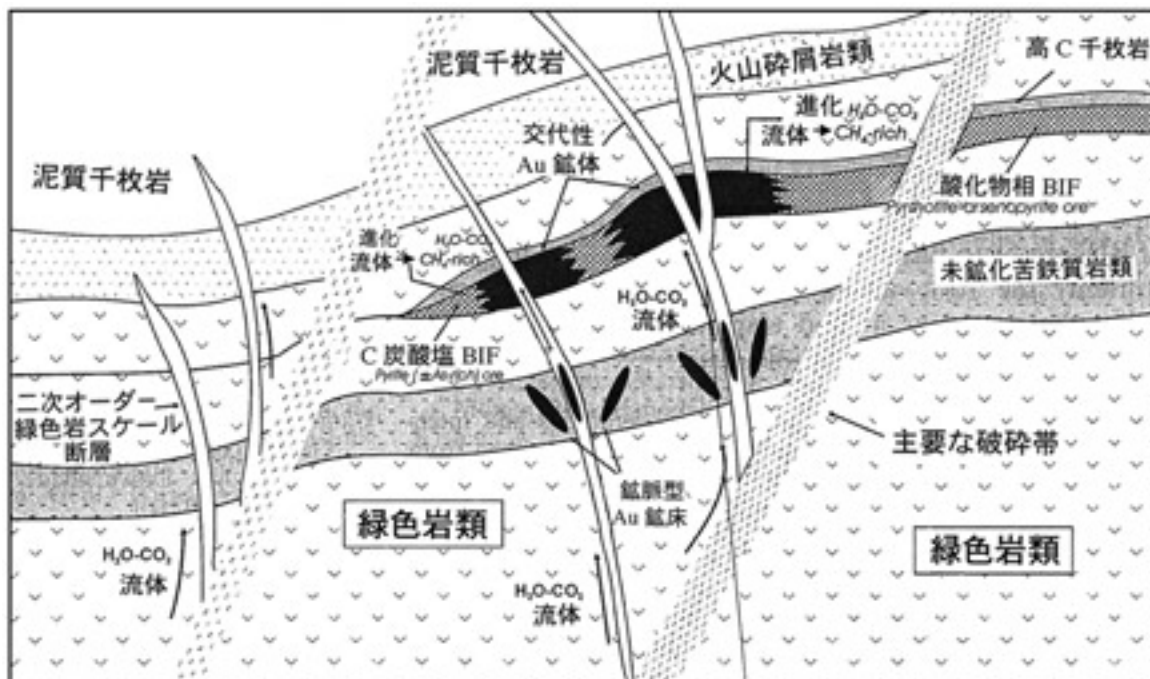
第8図 QF地域の金鉱床の母岩の種類、上：含量、下：鉱床数に基づく(Ribeiro-Rodrigues, 1998).

鉱に包有されるが、硫磁鉄鉱/磁硫鉄鉱または硫磁鉄鉱/脈石鉱物の境界でも認められる。金結晶は後期晶出の磁硫鉄鉱にも伴われるが、脈石鉱物と密接に産することは少ない。

7. 金鉱床の一般的特徴

以上の代表例に加えてその他のQF地域の金鉱床を概観すると、次のような特徴が浮かび上がる。

母岩の種類：母岩は全て緑色片岩相-角閃石相の変成作用を受けている縞状鉄鉱層-lapa seca, 縞状鉄鉱層または鉄に富むチャート, 苦鉄-超苦鉄質火山岩類と堆積岩類である。鉱床数から見ると(第8図上), 一般の縞状鉄鉱層を母岩とするものが最重要であり, 第2図の鉱床の多くが縞状鉄鉱層準の変質および硫化鉱物化鉱体として産出することを示している。ついで苦鉄質火山岩類, 珪長質火山岩類の順である。含量から見るとモロ ヴェロ鉱床が大きいために変質縞状鉄鉱層, すなわち縞状鉄鉱層-lapa secaが圧倒的に重要である(第8図下)。これは、灰～ベージュ色、塊状、一部片状組織を持つ炭酸塩鉱物に富む鉱石である。少量の石英、アルバイト、絹雲母、グラファイト、黄鉄鉱を含む。これが金鉱量の85%を占める。



第9図 QF地域の金鉱床の変成-交代性成因モデル (Lobato et al., 2001b).

金鉱床はノヴァ リマ層群中の衝上断層とそのつなぎ断層などに規制されている。その走向は北西系で主に北東傾斜であるか、または北東系、南東傾斜である。破碎構造は縞状鉄鉍層の縞状構造と平行であるため、原岩の堆積構造と見誤られたこともある。鉍化を受ける破碎帯は、厚さ0.5~20m、走向方向に10~300m、落とし方向に800~3,000m以上連続する。

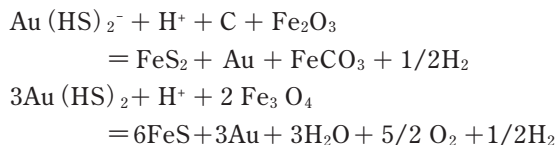
鉍化作用：金鉍化作用は破碎活動と共に生じた熱水活動によりもたらされた。その時期は変成作用後期~後変成期であり、変質作用の種類は縞状鉄鉍層の場合に硫化物化と珪化である。苦鉄質火山岩の場合には絹雲母化、炭酸塩化、緑泥石化、硫化物化であり、中心部で絹雲母化、周辺部で緑泥石化のゾーニングが見られる。

縞状鉄鉍層のAu含有量は40-300ppb、Ag含有量は10-140ppbであり、それらが鉍体ではAuが1-110ppm、Agが0.5-16ppmに増加する。As、Sの上昇も著しく、黄鉄鉍、磁硫鉄鉍、硫砒鉄鉍が産出し、金を含有する。

流体包有物データは一般に3-3.5kb、180-350℃、塩濃度NaCl等量3-5%、密度0.8-0.9g/cm³、その化学成分はH₂O、CO₂、CH₄、HS⁻、

N₂、H₂S、塩類である。炭素同位体データはδ¹³C炭酸塩=-4~-6%、δ¹³C有機物=-16~-20%、酸素同位体データはδ¹⁸O石英=+17%、δ¹⁸O炭酸塩=-15%、硫黄同位体データはδ³⁴S黄鉄鉍=+1.5~+5.4%である。

構成硫化物の種類と低い塩濃度から金は還元硫黄種と結合して運搬され、例えば次のような反応式によって金が沈殿したものと思われる。



8. 鉍床の成因：結びにかえて

以上のようにQF地域の始生代のオロジェニック金鉍床は、その生成温度、深度ともにエピサーマル鉍床(200℃、2kb)よりも大きく、300℃、3kb程度のメソサーマル金鉍床と考えられる。これら金鉍床は、大局的には層理面や片理面などの変成構造に沿って胚胎している。従って母岩と同時期に生成したとする同生説が提案されることは当然である。一方、鉍床は変成、変形地域に産出するために、

褶曲，断層などの構造規制を受けており，従って変成・変形後に鉱液が循環して鉱床が形成されたとする後生説も提案されている。

同生説の最も単純なものは，(1) 海洋底の噴気活動によってAu，Sが深部や海水から供給され，それと海水との混合により，温度，pH，Ehが変化し，Auや硫化物が沈殿するものである。一方，同生説でも(2) 複数回の濃集過程を経験した説，あるいは(3) 海洋底で濃集していたものが，変成時の変成流体によって構造的弱線に濃集した説などが，これまでに提案されている。

後生説としては(1) 近傍の火山岩として苦鉄質岩脈があるので，鉱床はランプロフィアか，あるいは潜在する珪長質貫入岩体からの鉱液によって変成岩の弱部に生成したもので，金属元素の起源も熱源も完全な後生的鉱床と考えるもの；(2) 鉱床は後生的に形成されたが，鉱液は構造・変成運動に伴い生じた「変成水」であり，鉱石成分は周囲の母岩（当地の場合は縞状鉄鉱層）から抽出された。それが故に鉱床は著しい構造規制を受けている。熱源としては，地温勾配によるもの，構造運動熱など；あるいは深成岩熱を考える。(3) 繰り返し後生説とも言える後生的に発生した鉱液が複数回循環し鉱床を形成した。

鉱石は，表紙や口絵で示したように“別子型銅鉱石”と似ているほど硫化物に富んでいる。しかし鉱床は銅でなく，金に濃集していること，砒素に富むなどの特徴がある。鉱床近傍の火成岩類は別子型よりもより苦鉄質なコマチアイトである。このような超苦鉄質火山岩の噴出によって，S，As，Auを濃集した海底噴気熱水鉱化作用があったのかもしれないが，現在は後生的に金が濃集したと考える人が多い。Lobato *et al.* (2001b)は第9図の模式図，すなわち変成鉱化流体が破碎帯に沿って上昇し，縞状鉄鉱層がスポンジのように鉱液沈澱の場を提供したモデルで，QF地域の金の成因を説明している。

QF地域の主力鉱床は縞状鉄鉱層に伴われる。鉱床付近で新鮮な縞状鉄鉱層を見ることは難しいが，変質が最も弱い縞状鉄鉱層は40～300ppbの金含有量を持っている(Ribeiro-Rodrigues, 1998)。もしそうであるならば金は一般岩石では1ppbオーダーであるから，高金濃度変成鉱液を得るのに好都合である。このように鉱床は，縞状鉄鉱層や火山

岩類に初生的にやや濃集した金が構造的な変形後に熱水循環によって弱線沿いに再濃集して生成したのではなかろうか，との印象を筆者は持った次第である。

謝辞：巡検を用意され，また参加者の質問にも丁寧に対応されたL. M. Lobato教授，草稿を読まれて有益な助言を与えられた神谷雅晴さんに感謝する。

文 献

- Cordani, U. G., Sato, K., Teixeira, W., Tassinari, C. C. G. and Basei, M. A. (2000) : Crustal evolution of the South American platform. *In* Tectonic Evolution of South America, Rio de Janeiro, 19-40.
- Groves, D. I., Goldfarb, R. J., Gebre-Mariam, H., Hagemann, S. G. and Robert, F. (1998) : Orogenic gold deposits - a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit type. *Ore Geol. Review*, 13, 7-27.
- 石原舜三 (1986) : カリフォルニアの金鉱床。地質ニュース, no. 379, 6-21.
- 石原舜三 (2000) : ウズベキスタンの金鉱床：破碎帯型，多金属型，そしてボーフリー型。地質ニュース, no.552, 7-22.
- Lobato, L. M., Ribeiro-Rodrigues, L. C. and Zucchetti, M. (2000) : Geology and gold mineralizations in the Rio Das Velhas greenstone belt, Quadrilatero Ferrifero (Minas Gerais State, Brazil). 31st IGC, Post-Congress Field Trip, Aft. 12, 34p.
- Lobato, L. M., Ribeiro-Rodrigues, L. C., Zucchetti, M., Noce, C. M., Baltazar, O.F., da Silva, L. C. and Pinto, C. P. (2001a) : Brazil's premier gold province. Part I: Geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilatero Ferrifero. *Miner. Deposita*, 36, 249-277.
- Lobato, L. M., Ribeiro-Rodrigues, L. C. and Vieira, F. W. R. (2001b) : Brazil's premier gold province. Part II: Geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilatero Ferrifero. *Miner. Deposita*, 36, 249-277.
- Pereira, S. L. M., Jardim, E. C. and Ferreira, J. E. (2000) : Sao Bento Mine. Eldorado Gold Corporation, Guidebook prepared for the 31st IGC Excursion, 46p.
- Ribeiro-Rodrigues, L. C. (1998) : Gold mineralization in Archean banded iron-formation of the Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil - The Cuiaba Mine. *Aacgeber Geowissensch. Beitrage*, 27, 262p.
- Vieira, F. W. R., Biasi, E. E. and Lisboa, L. H. A. (1991) : Geology of and excursion to the Morro Velho and Cuiaba mines. *In* Field guidebook of Brazil Gold '91: The economics, geology, geochemistry and genesis of gold deposits. Depart. Nacional Prod. Mineral, 87-99.
- 渡辺公一郎・林 秀 (1994) : 南アフリカ，バーバトン・グリーンストーン帯の金鉱床-31億年前の鉱化作用-。地質ニュース, no. 479, 14-18.

ISHIHARA Shunso (2004) : Gold mineralizations and BIF: An example in the Sao Francisco craton, Brazilian shield.

< 受付：2004年2月6日 >