

SEG, 世界の資源探査2002: 鉱床発見に至る蓄積された探査手法, および現在の北米大陸 南西部のポーフィリー型銅鉱床について

石原舜三¹⁾

1. はじめに

アメリカの鉱床学会は例年秋にアメリカ地質学会(GSA)と一緒に、地域的な中心地であるデンバーで行われることが多く、昨年も10月26日~30日に当地で行われた。これはサイエンスとしての鉱床学の研究発表の場として知られている。鉱床学は資源の探査及び利用の側面から鉱業界とも密接に関連しており、鉱業面からの成果の発表会がほぼ10年に1回の割合で開かれている。昨年はその年に当たり、研究発表会が2002年4月14~16日にデンバー新空港とデンバー市街地との中間にある新し

た5テーマで実行された。

前回紹介したバンクーバーの“現場担当者会議”(石原ほか, 2002)が最近1年間の生の実践的な探鉱活動を伝えるものであるならば、ここデンバーの会合は鉱業及び研究面で最近活躍した世界の鉱床を整理した形で見ることが出来ると共に、現時点での世界の関心がどの辺りにあるかが解る。その意味で講演の概要を紹介する。この会には6つの巡検が用意されたが、筆者は30年ぶりに由緒ある北米大陸南西部のポーフィリー型銅鉱床を見学した。現在の北米大陸南西部の銅鉱山業についても現状を紹介し、印象を述べてみたい。



写真1 学会会場となったホリデイ・インDIA(デンバー国際空港)。

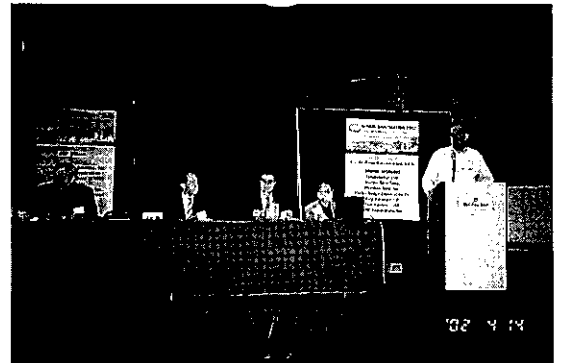


写真2 開会に先立ち挨拶をする鉱床学会新会長, Hugo Drummet。彼は夏に南アで交通事故により急逝した。

い集会地であるホテル街(写真1)で開催された。

今大会はGlobal Exploration 2002: Integrated Methods for Discoveryと題するものであり(写真2)、この10年間に話題になった世界の主要鉱床について講演者が指名され、その間の探査成果が発表された。また、古くから掘り続けられている巨大鉱床の近況も報告された。ポスター発表は別に71件が用意された。またワークショップも時流に則し

2. 講演の概要

第1日午前 巨大鉱床の四次元描写

- (1) ノルリスク成因モデルの最近の進歩と、そのPGM(白金族金属)-Cu-Ni鉱床探査への応用。S. Diakov(BHPピリトン)ほか4名。
- (2) 地球史におけるミシシッピー溪谷型Pb-Zn鉱床: 鉱床成因, 地殻内流体移動, 探査, そして

キーワード: 探査手法, ポーフィリー銅鉱床, ビマーミッション, カナネア, モレンシイ, アリゾナ州立大学

1) 産総研 特別顧問

頁岩母岩型鉱床 (SEDEX) との関係。

D. Leach (アメリカ地調) ほか4名。

(3) 南ア, ウィットウォーターズランド金鉱床の時代論に関する最近の進歩。

H. F. Frimmel (ケープタウン大) ほか1名。

(4) 開山100周年のビンガム峡谷ポーフィリー銅鉱床。

G. H. Ballantyne (ケネカット探鉱社) ほか4名。

キーノート講演-I. D. Whitehead (BHPピリトン): 探査哲学-探鉱とビジネスの新しい視点。

第1日午後 事例研究-広域探査

(5) 中央ユーラシア金鉱化作用の構造的背景, 特徴と広域探査基準: 特に南部天山地域。

A. Yakubchuk (英国自然歴史博物館) ほか3名。

(6) ダイヤモンドの世界的視野の探査: スケールの視点から。

T. E. McCandless (アシュトン鉱業社)。

(7) アラスカ-ユコン州, ティンティナ金鉱化帯の地質, 探査, そして発見。

C. J. R. Hart (西豪州大) ほか7名。

(8) インドネシア, スムバワ, バツ・ヒジャウ ポーフィリー型銅-金鉱床における貫入岩関連熱水系のスタイルとジオメトリー。

S. Garwin (ニューモント鉱業社)。

(9) 金鉱化作用を指示するカリウム質火成岩類: パプア ニューギニア, リヒール島のラドラム金鉱床。

D. Muller (フライブルグ鉱山大) ほか3名。

第2日午前 既知鉱化域における鉱床探査: 基幹構造の陰で

(10) ペルー北部, ヤナコチャ産金地域の地質概要。

L. Teal (ニューモント鉱業社) ほか1名。

(11) ポルトガルのイベリア黄鉄鉱帯, 世界級のノヴェスコルポ鉱床: 発見後25年の現状と将来。

J. M. R. S. Relvas (リスボン大) ほか11名。

(12) ネバダ州, カーリン トレンド中のゴールド・ストライク鉱区の探査と地質: 1962~2002年。

K. Bettles (パリック ゴールド・ストライク鉱山)。

(13) 西アフリカ, ガーナ, アシャンティ金鉱山における構造規制と金鉱化の中心。

A. H. Allibone (ジェイムス・クック大) ほか7名。

(14) 巨大なエル・テニエンテ銅鉱床: 初生鉱体の拡がりと生成条件。

M. A. Skewes (コロラド大) ほか4名。

第2日午後 事例研究-地域探査

(15) サンビア, カンサンシ Cu-Au 鉱床の地質と探査史。

A. W. Broughton (コロラド鉱山大) ほか2名。

(16) コロラド州, クリップル・クリーク 鉱山地帯の最近の探査活動。

D. M. Vardiman (クリップル・クリーク 鉱山) ほか4名。

キーノート講演-II. S. Walters (ジオディスカバリー社): オーストラリア, マウント・アイザ 鉱化帯, カニントン Ag-Pb-Zn 鉱床の発見史と地質。

第3日午前 探査のドルとセンス

(17) 鉱物資源探査と鉱業界に見られる歴史的傾向と要点。

G. G. Snow (バランカ資源社) ほか1名。

(18) 鉱業界における勸進元: 技術革新とビジネスの統合。

L. W. Freeman (ダウニング・ティール社)。

(19) 世界は良く調べられたか?

D. B. Silver (バルフォー・ホールディング社)。

(20) アルゼンチン/パタゴニア, エスクエル低硫化型浅熱水性金鉱床の発見史と地質。

R. H. Sillitoe (自営コンサルタント) ほか4名。

キーノート講演-III. M. Viljoen (ウィットウォーターズランド大): 世界におけるプラチナ資源-その地質とビジネス。

第3日午後 被覆層の下: 潜頭鉱床探査

(21) この10年間の新アイデア: オーストラリア, 北西クィーンズランド州のセンチュリー亜鉛鉱床の探査史と地質。

G. C. Broadbent (リオティント探鉱社) ほか2名。

(22) メキシコ/ザカテカス州, フレスニョ (鉱脈型) 及びフランシスコ I. マデロ (SEDEX型) Ag-Zn 鉱化域の発見。

D. Gilles (インダストリアス・ペルス社) ほか2名。

(23) 潜頭性ダイヤモンド鉱床探査。

H. Helmstaedt (クィーンズ大)。



写真3 今年度の各賞受賞者が紹介される鉱床学会の昼食会。



写真4 ペンローズ金賞を授与されたペンシルバニア州立大の元教授 H. L. Barnes 夫妻(右二人)と紹介者の大本洋現教授(その左)。

(24) ブラジル、アマゾン地塊、セラ・ペラダ堆積岩母岩浅熱水性Au-PGE鉱床とそのカラジャス鉱化域のFe酸化物-Cu-Au鉱化作用との成因的密接性。

C. J. Grainger (西豪州大)ほか2名。

(25) テクニカルプログラムの総括。

O. D. Christenson (ニューモント社)。

ここに取り上げられた歴史ある巨大鉱床の成因は、日本に居ると解決済みの感じを受けるが、従来の定説にも不確定要素が多くあり、例えば南アのウィットウォーターズランド鉱床では砂金鉱床とする古典的な水成論に対して、金粒の再移動、閃ウラン鉱、黄鉄鉱の起源に関しては後生熱水説も有力である。ザンビアの砂岩型銅鉱床に関しても、同生説と熱水説の間で議論が戦わされているなど、新しい問題が幾つも存在し、最新の研究から目を離すことが出来ない。

なお会期中には鉱床学会の昼食会が開かれ(写真3, 4)、今年度の各種表彰が行われた。名著「熱水性鉱床の地球化学」の編者であり、初版以降3回に亘って改訂したペンシルバニア州立大の名誉教授、H. L. BarnesにPenrose Gold Medalが授与され、同僚の大本洋教授が同氏の業績を称えるスピーチを行った。

この講演会の前後にそれぞれ2日ずつ費やしてワークショップが開かれた。そのテーマは次の5件であり、いずれも現在重要と考えられるテーマを選んでいる。(1) GIS利用の探索図の作成、(2) 探索技術とその活用、(3) 巨大鉱床の内部構造-金の場合、(4) 巨大鉱床の内部構造-ベースメタルの場合、

(5) ダイヤモンド-根源岩から海へ。

巡検は会議前の4月9～13日に次の2件が行われた。

(1) 南西部アメリカ合衆国とメキシコ/ソノラのポーフィリー型銅鉱床。

(2) メキシコ/ザカテカス中央区域の鉱床群、サンニコラスVMS鉱床、フランシスコI. マデロSEDEX型鉱床、ほかに鉱脈型鉱床など。

会議後巡検は次の4件であった。

(3) ネバダ州北部のカーリン型鉱床とその広域的な位置(4月17～21日)。

(4) コロラド州、クリブル・クリーク鉱脈地域(4月17日)。

(5) カナダ/オンタリオ州、サッドベリー鉱化地帯(4月18～20日)。

(6) コロラド州、ステイト ライン キンバーライト地域とキルシーレイク鉱山。

3. 昨今のアリゾナ鉱業界

アメリカ合衆国南西部のポーフィリー型銅鉱床はその二次富化帯の採掘から1905年にユタ州のビンガムにおいて始められたが、モレンシィ(1907年開山)を初めとして多数の鉱床はアリゾナ州南部に分布する。この型の銅鉱床が銅資源として最も重要である点は現在では世界に広く認識されているが、その知識普及の口火を切ったのは恐らくSpence R. Titleyの出版物(Titley and Hicks, 1966)である。この本によって、当時二次富化帯を中心に採掘し

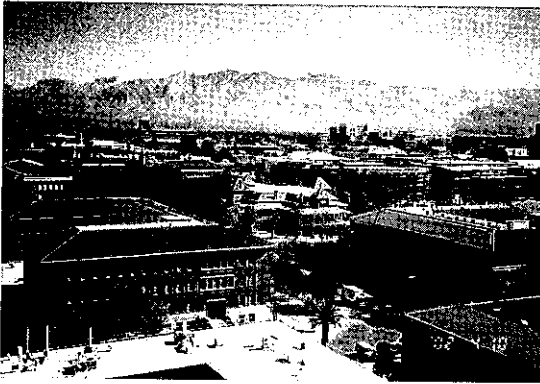


写真5 売げ山を背景に赤いタイル造りのアリゾナ州立大
キャンパス。中央に二階建ての元地質学部教室
が見える。

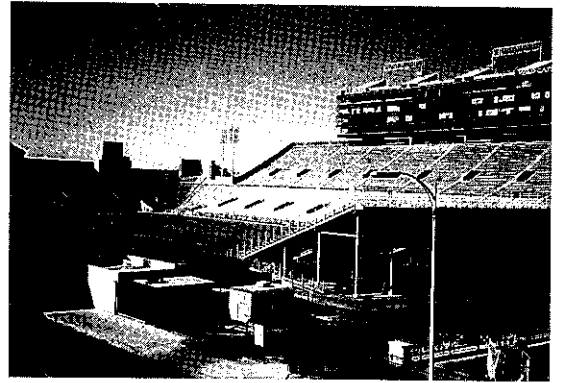


写真7 大学のフットボールチーム、ワイルド キャットの新
球技場。



写真6 地質学部の新しいビル(右手遠方の高層ビル)と
ワイルド キャットのスコア・ボード裏側。



写真8 元気に巡検の案内をされたS. R. Titley教授
(73歳)。

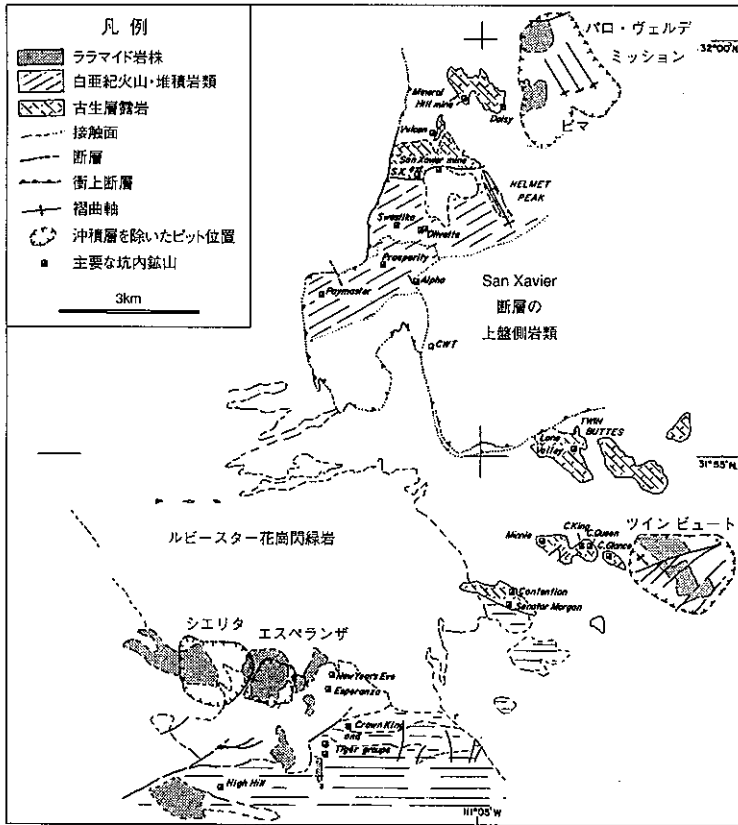
ていたポーフィリー型銅鉱床の実態や探査方針が
明らかにされ、その後の世界の乾燥地域における
多くの鉱床の発見に繋がった。彼はその後第2編
(Titley, 1982)を出版し、この中では初生鉱化作用
を中心に編集している。

スペンスは1932年コロラド州の生まれ、ゴールデ
ンのコロラド鉱山大学で工科系に近いGeological
Engineeringの学部教育を受け博士過程を終了し
た後、アリゾナ州立大で教育と研究に従事してき
た。この大学には定年制は無いため、今年73歳と
なる彼は一クラス百名に達する1-2年生用の鉱物
資源入門から3-4年生、そして大学のクラスと計6
コースを講義しているそうである。日本では鉱床学
の講義をする所は非常に減っていると話すと、研
究面では鉱山開発に伴う環境面のテーマが増えた
が、高度の機器・技術に依存する現代社会では鉱
物資源はますます重要となっているから、その講

義は欠かすわけにはいかないと話していた。

筆者が北米大陸南西部のポーフィリー型銅鉱床を
解説するために、この地を訪問したのは1960年代
末であり、その見聞記は本誌に紹介した(本誌162,
163, 165, 167, 168, 169, 171号参照, 文献省
略)。当時のこの地域では20鉱山が稼働中であり、
新鉱床が次々と発見されており(石原, 1969)、鉱業
界は活況を呈していた。アリゾナ州立大学の地質
学教室ではこれら地元の鉱業界に役立つ人材を修
士レベルまで教育し、大量に供給する役割を果た
していた。

巡検に先立ち1日早く到着してアリゾナ州立大学
の地質学教室を30年ぶりに見学したが、最も大き
く変わったのはこの大学ではなかろうか。かつては
地質学部を含めて数階建ての建物であったが(写
真5)、現在は10階建て以上の高層化が目立ち(写
真6)、地質学教室も2階建てから10階建ての校舎



第1図
アリゾナ州、ピマ鉱業地帯の地質概要と鉱床 (Titley, 1994).

に移っていた。地質学もかつての野外地質学から同位体地質学を含む近代的な研究手法、すなわち実験室を充実させている。総学生数は35,000人に達しているようで、フットボール チーム ワイルド キャットの専用球技場も一新された(写真7)。

教室ではオーソドックスな鉱物資源論のほか、鉱山開発に伴う環境問題・地下水汚染に役割が増大し、資源と環境に志向している印象を受けた。また従来の教育担当教官のほかに研究のみ担当し、教育負担がない研究者を採用し、研究面を充実している。

4. ピマ・ミッションからビスビーへ

巡検第1日はテュソンから南へ32km下ってピマ・ミッション鉱床の見学である。私達は15人乗りのマイクロバス2台に分乗した。この鉱床の周辺にはサイプロス・ピマ、San Xavier 鉱山、アイゼンハワー 鉱山、約11km南方にはツイン・ビュート 鉱山、南南

西方約16kmにはシエリタ 鉱山、エスペランザ 鉱山がある(第1図)。これらは含有総銅量41～220万トンの小～中規模クラスの鉱床であるが(第1表)その数が多く、鉱石供給面でアリゾナ 鉱業界に大きく貢献してきた。因みに日本の最大銅山はメタル量で65万トンである。

1968年当時はピマとミッションは独立の鉱山として、またエスペランザ 鉱山も稼行されており、ツイン・ビュートとシエリタはまだ削土中、その他鉱床は未開発の状態であった。ミッション 鉱山のオーナーであるASARCO社がピマ 鉱山を買収し、現在はピマ・ミッション 鉱山として稼行中である。ピマとミッションを合わせると総銅量約300万トンであり、この地域最大である(第1表)。

この地域の鉱床は先カンブリア紀の基盤上の古生代後期の炭酸塩岩を含む堆積岩類がラマロイド期^(注1)の火成活動を受け、炭酸塩岩類にタクタイト^(注2)と称される浅成のスカルン型の銅鉱床が、貫入岩類の周辺に鉱染・網状の銅鉱床が胎するもので

第1表 アリゾナ州ピマ鉱山地帯のポーフィリー型銅鉱床の生産量(1955-76)と1977年における残存鉱量(Titley, 2002).

	生産量				残存鉱量				
	鉱石量 ($\times 10^6$ トン)	Cu ($\times 10^3$ トン)	Mo (トン)	Ag (kg)	鉱石量 ($\times 10^6$ トン)	Cu (%)	Mo (%)	総銅量 (トン)	
ミッション	109.0	619.0	9235	227.0	104.5	0.73	0.019	1,381,586	
ピマ	200.0	865.3	7512	375.7	146	0.48	n.d	1,566,087	
パロ・ヴェルデ	0.5	8.8	n.d	n.d	156.5	0.65	n.d	1,026,050	
San Xavier	2.7	19.1	n.d	n.d	硫化鉱 酸化鉱	166.9 1.1	0.52 1.48	n.d n.d	886,999 16,280
南部 ツイン・ビューツ	69.3	46.5	5,271	215.5	硫化鉱* 酸化鉱**	329 57	0.67 1.10	0.03 n.d	2,250,749 62,700
シェリタ	224.8	548.0	44,897	209.6	460	0.32	0.033	2,019,354	
エスペランザ	86.3	314.6	16,153	107.3	22	0.42	0.022	406,387	

*カットオフ 2%Cu, **カットオフ 6%Cu.



写真9 ヴューポイントから見るピマ・ミッション ピット.

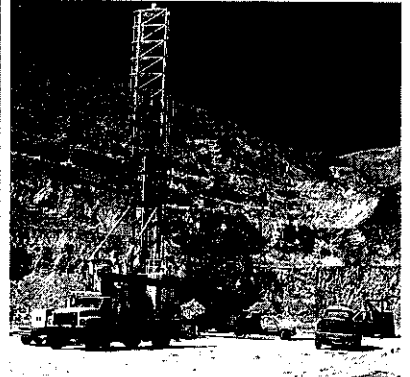


写真10 採掘発破用の鑿孔機. ミッション2,110'レベル.



写真11 層理面沿いに走る脈状の硬石膏-石膏. ミッション2,090'レベル.



写真12 高品位塊状鉱(タクタイト), ミッション2,090'レベル.

ある。その鉱化時期はララマイド期である。ピマ・ミッション地域では上部古生代堆積岩類は三疊紀に著しい横圧力を受け、地層が逆転している。その後若干の中生代陸成層の堆積があり、ララマイド期の珪長質岩類の貫入を受ける。

貫入活動は67-57Maの放射性年代を示し、3時期に分けられる。第1期は67Maの微細等粒の角閃

石黒雲母閃緑岩である。第2期は63-60Maのルーバー・スター花崗閃緑岩の貫入である。これと同質の花崗閃緑斑岩はシェリタ、エスペランザ、ツイン・ビューツでは鉱化関係火成岩である。ピマ・ミッションではこの花崗閃緑岩に遅れてより分化した石英モンゾニ斑岩(58-55Ma)がプラグ・岩脈状に貫入し、変質鉱化作用をもたらした。

この鉱床ではまずビューポイントから2鉱山の合



写真13 北西より望むテュムストンの町。

併により複雑な形に発展した現在のピット(写真9)で地質概要の説明を受け、ピットに降りて見学した(写真10)。現在の生産量は露天掘りにより33,000トン/日(品位Cu0.6%)、東鉱体の坑内掘りで3,000トン/日(品位Cu1.5%)、精鉱中にAg100g/tが含まれ回収されるが、輝水鉛鉱は回収していないとの事であった。

石英モンゾニ斑岩類は母岩の炭酸塩岩類の層理面、北西系の褶曲構造、断層などに規制されて貫入し、変質鉱化作用を伴う。斑岩中ではカリウム変質が顕著で、絹雲母変質がこれに次ぐが、絹雲母変質は非炭酸塩岩類の細脈状鉱化部分の盤際に出現することが多い。

また炭酸塩岩に遭遇してタクタイトを生じるが、その鉱物組成は原岩の種類により規制され、ドロマイトの場合は透輝石が主であり、石灰質岩ではアンドラナイト柘榴石が主体である。その他のタクタイト鉱物は透角閃石、黒雲母、磁鉄鉱、方解石、石英である。石膏と方解石が割目に沿って産出し(写真11)、明ばん石も見られるが、これは二次的なものと考えられている。

鉱化作用は主にタクタイト中に硫化物が鉱染状であり、局部的には塊状(写真12)、細脈状に見られるものである。黄銅鉱、黄鉄鉱、輝水鉛鉱が主体で、少量の閃亜鉛鉱、斑銅鉱、テンナンタイトー四面銅鉱、輝銅鉱、方鉛鉱、バレリ鉱が付随する。

ピマ・ミッション鉱床に限らず、この地域の鉱床はその多くが沖積層下の潜頭鉱床として発見されたために、開山前の削土量が大きく、削土は周囲にテーブル状に積み上げられている。従って道路網は現在では人工的な谷間を走る。緑を取り戻す

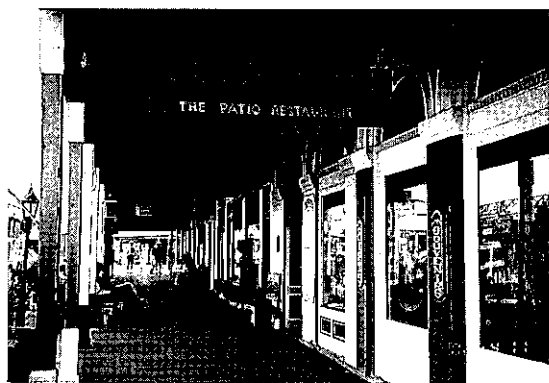


写真14 古いスペイン風の建物を生かした町並み。

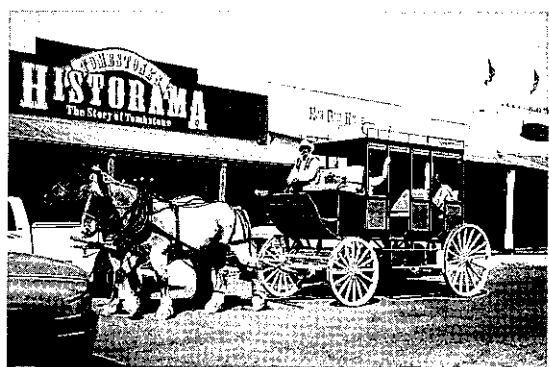


写真15 町内観光客を運ぶ2頭立て馬車。

べく、削土上に様々な種類の植物を植えるテストが繰り返されているようで、いずれは乾燥に強い植物で覆われる日が来るかも知れない。

ピマ・ミッション見学後、私達は南東へ今夜の宿泊地ビスビーに向かって走った。途中テュムストーン(Tombstone)⁽¹³⁾で小休憩した(写真13, 14)。テュムストーンは今は花崗岩体の名前として残るエドシーフェリンがインディアンとの戦争の最中、銀鉱を見つけて探鉱を始めた所であり、1877年から栄えた鉱山町である。その鉱産額は1938年までに3,700万ドルであったと言われている。現在では観光地として知られ、馬車が走り(写真15)西部開拓史に残る数々のエピソードが語り継がれている。中でも圧巻なのは銃で勝負を付けていた無法時代の墓場であろう。撃たれて死亡した年、墓によっては撃った相手の名前まで十字架に記録されている。

テュムストンの鉱床は鉱脈型と塊状交代型の2つの産状を有する。共に古生代上部の堆積岩類に胚



写真16 ビスピー(ワーレン鉱床地帯)のラベンダーピット。

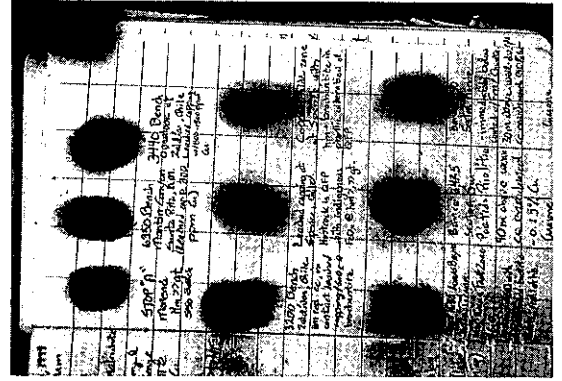


写真17 鉄酸化物を削り粉末化し、野帖に記録する。

亜鉛鉱、方鉛鉱、ラッキーカス鉱山では多量のアラバンドイト(MnS)が産出した。

ビスビーではラベンダーピットを見晴らし台から見学したが30年より一廻り大きくなって(写真16)採掘を終了している。ビスビー付近は“鉄焼け”が著しく、鉱体の内外共に褐鉄鉱による赤褐色の汚染が著しい。その色と鉱物組成、銅鉱化作用との関係を見るために、粉末の色を野帖に指先でこすり付け(写真17)サンプリングする方法が使われている。

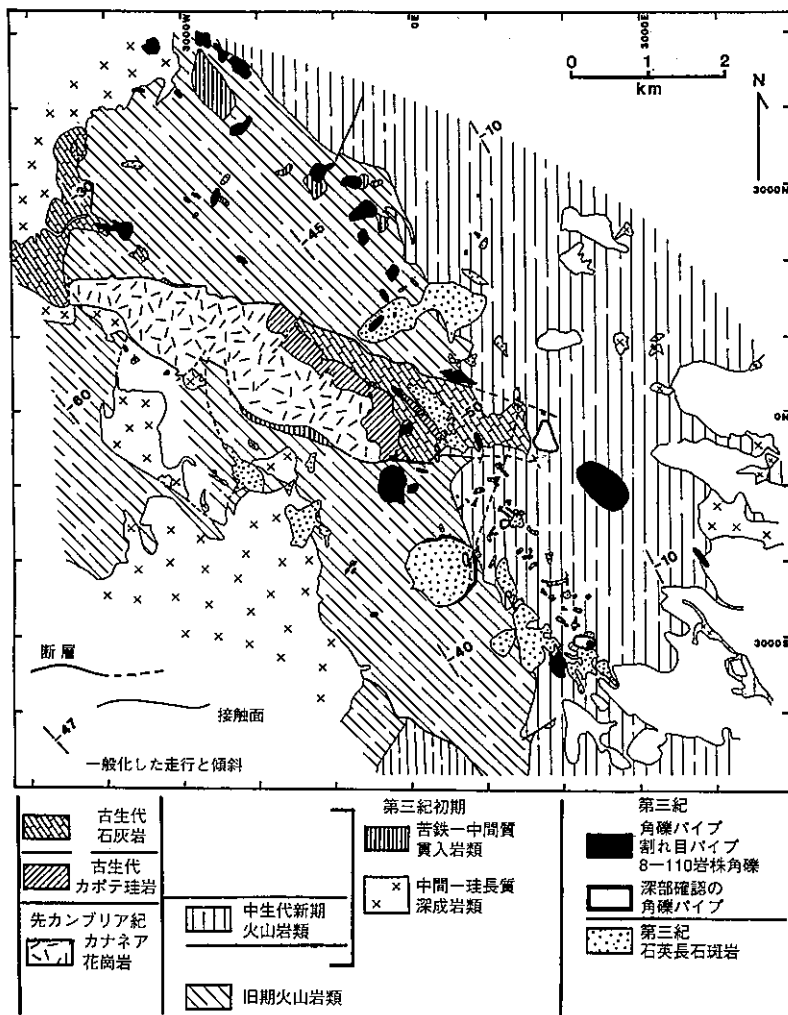
胎するもので、鉱化関係花崗岩であるシーフェリン花崗閃緑岩は白亜紀後期の年代を持つ。稼行鉱石の主力は酸化帯のマンガン酸化物と共に産する自然銀であった。地表下250m以深では黄銅鉱、閃

5. カナネア

カナネアはメキシコ・ソノラ郡下、国境の南40kmにあり、巨大鉱床である上に角礫パイプが多く興味



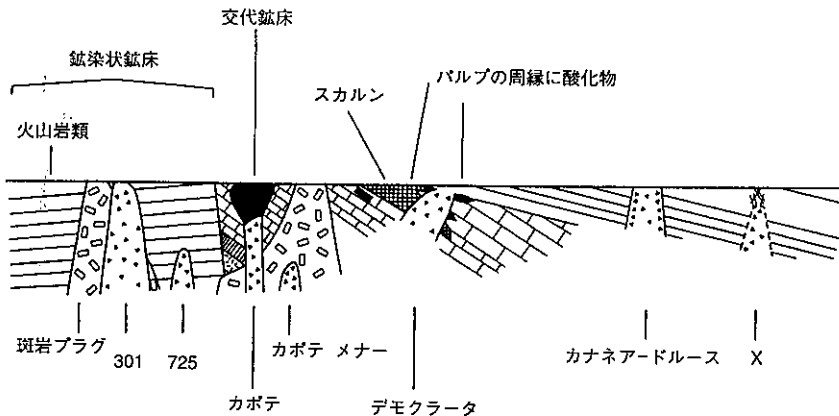
写真18 カナネア鉱山、ビューポイントからみるコロラダピット。



第2表 カナネア鉱床における
1979年8月時点での推定
生産量(Meinert, 1982).

鉱染状二次富化帯と初生角礫パイプ	
カナネア ピット	45.4万トン
コロラダ ピット	24.9万トン
ソノラ・ヒル ピット	22.7万トン
キノ ピット	7.5万トン
イースト ピット	5.4万トン
西と東地区(坑内掘り)	29.5万トン
合計	135.4万トン
角礫パイプ	
ラ・コロラダ	49.9万トン
カボテ	5.9万トン
コブレ・グランデ-キルク- デモクラータ	5.7万トン
オーバーサイト	4.5万トン
ヴェダ・グランデ	4.5万トン
カナネアードルース	3.5万トン
エンリエタ	2.3万トン
合計	76.3万トン
スカルン鉱床	
プエルテシトス	8.0万トン
エリサ	4.5万トン
シエラ・コブレ-カムパナ	2.7万トン
合計	15.2万トン
総計	226.9万トン

第2図 メキシコ、ソノラ州、カナネア鉱床地帯の地質概略図 (Bushnell, 1988).



第3図
カナネア鉱床の模式断面図
(Bushnell, 1988).

深いタイプである。私は1960年代にも訪問する機会があったが、当時は日本人にはツーリストクーポ

ン\$3の他、ビザ取得料\$8必要な上に、アメリカ側への再入国手続きがやかかいで結局訪問せず、今



写真19 コロラダ ピット北壁の角礫パイプ鉱体.



写真22 砂岩を母岩とする初生鉱石.

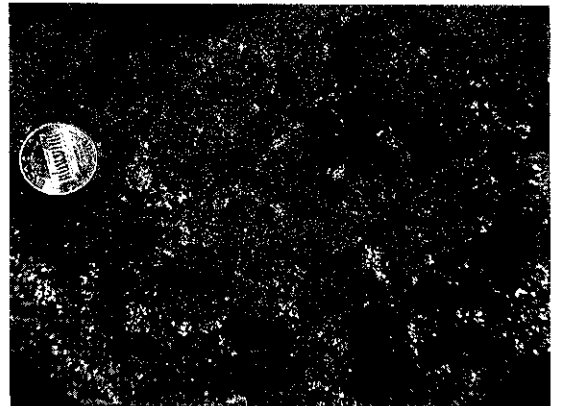


写真23 スカルン中の高品位鉱石(デモクラータ).



写真20 電気石がマトリックスを埋める角礫岩(1,710' L).



写真24 二次的明ばん石脈(1,800' L).

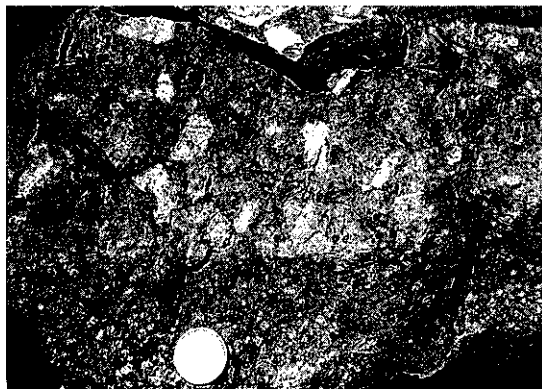


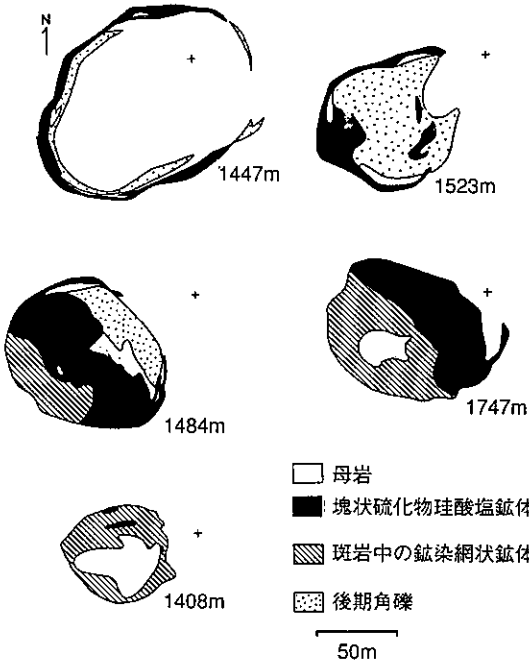
写真21 第2期の石英長石斑岩.

回が筆者にとって最初の訪問となった。

私達は長いドライブに備えて朝7時過ぎにビスビーを出発し、途中の国境越えも難なく通過し、鉱山地帯に到着した。カナネア鉱山は多数の鉱体が北西-南東10km, 北東-南西4kmの範囲に散在しており(第2図)、且つ地元で選鉱、製錬、リーチングが行われているから、非常に大きな産業地帯の印



写真25 ヴューポイントから北北西方カボテ盆地を見る。マラカテピット(左)、精錬所(中央遠方)と選鉱場と市街地(右)。

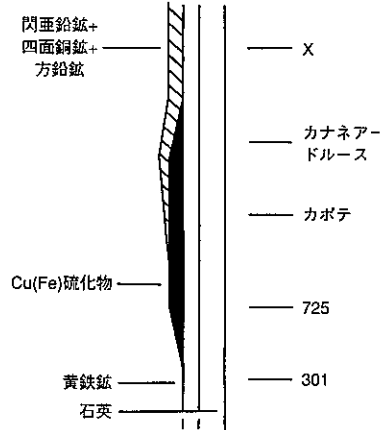


第4図 カナネア鉱床、ラ・コロラダ角礫パイプ鉱体の深度別変化 (Bushnell, 1988)。

象を受けた(写真18-26)。現在の生産量は浮選鉱石80,000トン/日、リーチング鉱石15万トン/日である。鉱山は33万トン/日の処理能力を持つから、現在は減産中である。年間生産銅メタル量は20万トンとの事であった。残存鉱量は75億トン(Cu 0.4%、銅量300万トン)、その内50%は石英長石斑岩、30-35%は火山岩類、15-20%がスカルン鉱体中に産出する。

鉱体別の銅生産量は第2表のように見積もられている。

カナネア地域は地質的にはアリゾナ州の鉱床帯



第5図 カナネア鉱床、角礫パイプ鉱体の垂直変化 (Bushnell, 1988)。

の南方延長部に相当し、先カンブリア紀のカナネア花崗岩(14.4億年)を基盤とする。その上にアメリカ南西部で一般的なカンブリア紀ボルサ珪砂岩が不整合に堆積し、その上位にはカンブリア紀から石炭紀の炭酸塩岩類が整合的に乗っている。これらを不整合関係で層厚1,500mの中生代旧期火山岩類と層厚1,800mの新时期火山岩類(K-Ar, 67.4Ma)が覆う。

これらに貫入して閃緑岩～閃長岩が大規模に貫入し、また苦鉄質岩～ランプロフィアが岩株、岩脈状に火山岩・堆積岩類に貫入する。その後鉱化を伴う石英長石斑岩が岩株状に貫入する。角礫パイプの形成はこれと同時期と推定される。鉱化作用は石英-長石斑岩中とその周辺のスカルン鉱体、石灰石交代鉱床、そして角礫パイプに及ぶ。その模式的な鉱化断面及び鉱体名を第3図に示す。

角礫パイプは水平、垂直方向共にゾーニングを



写真26
写真25の右方, リーチング場(中央)
と尾鉱捨て場(中央遠方),



写真27 乾燥地域に造られた清潔な感じのモレンシの町。



写真28 特徴的な崖を形成するカンブリア紀のコロラド珪質砂岩。

示す。平面的には角礫パイプの周縁部が高品位で、塊状硫化鉱が産出する傾向がある。パイプ中心部あるいは下方へ鉱染—細脈状の産状を呈する。角礫パイプの中心はより後期の細角礫や母岩が充填する。黄鉄鉱と石英は角礫パイプの全てのレベルで認められるが、閃亜鉛鉱、四面銅鉱、方鉛鉱はパイプ上部で卓越し、黄銅鉱、斑銅鉱、初生輝銅鉱、コベライトは下部に産出する。ラ・コロラダ鉱体における垂直的な形体変化を第4図に、硫化鉱物の垂直変化を第5図に模式的に示した。

6. モレンシ

モレンシはアリゾナ州で最大のポーフィリー型銅鉱床であり、アメリカ合衆国銅生産量の18%を占めている。地質文献が無いことで著名で、石原(1969)に引用したMoolick & Durek(1966)以降は未公表の博士論文が1件あるのみである。今回は所有者のフィリップス・ドッジ社によるファクトシートの1枚に基づく説明があった。このシートによると、

1,700立方フィートのアメリカの家屋は400ポンド、自動車1台は50ポンドの銅を使っており、新しい1ドルコインはCu 90%の純度を持つ。

モレンシはこの銅鉱業の為に造られた清潔な感じの町であり(写真27)、環境・保安面で幾つもの表彰を受けている。人口は4,200人、モレンシ高校の学生数は1,100人である。1,157の社宅があり、その内54戸が空き家である。

モレンシ鉱床の発見は騎兵隊によるもので1865年に遡り、最初の生産は1872-1882年の高品位鉱(Cu 20%)であった。フィリップス・ドッジ社は1881年に鉱業権を取得し、坑内採掘を1932年まで続けた。露天掘りによるバルクマイニングは1939年に採用され、以後44億トンの鉱石・捨石が採掘された。1939年以降現在までの販売銅量は実に1,111万トンの大きさに達している。

モレンシ鉱床の鉱化作用も他地域と同様に、先カンブリア紀花崗岩類に不整合に堆積した炭酸塩岩類を含む古生層にララマイド期の斑岩類が貫入し、鉱染・網状とタクタイト型の鉱化作用を伴う



写真29 モレンシ鉱山、メットカーフピットを望む。

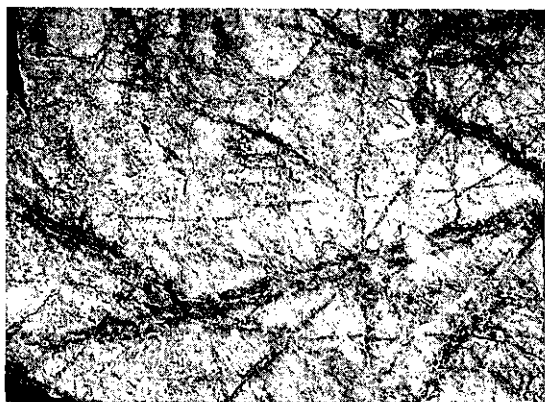


写真30 メットカーフピット、網状鉱石。

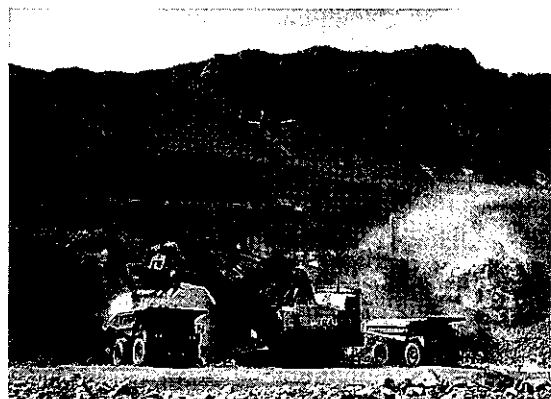


写真31 コロナドピット。240トントラックへの積み込み風景。

第3表 主要鉱床の二次富化作用の特徴 (Titley and Marozas, 1995)。

鉱山名	二次鉱体		初生 鉱品位 Cu%	初生黄 鉄鉱量 重量%	黄鉄鉱/ 黄銅鉱比	濃縮度
	厚さ(m)	品位Cu%				
モレンシ	10-250	0.8	0.1-0.15	3-8	>10:1	5-8倍
サンタリタ	>100	0.85	0.1-0.3	?	10:1	2-8倍
レイ	10-75	0.85	0.1-0.2	3	>10:1	4-8倍
シルバール	10-150	0.8	0.1-0.3	6-8	>10:1	6倍
ミネラルパーク	200	0.34	0.069	3-4	10:1	4-5倍
インスピ レーション	?	1.12	0.15-0.4	?	?	2-6倍
ラカリダード	>500	0.64	0.2-0.25	2-3	5:1	3-4倍
カッパー シティズ	30-100	0.63	0.15-0.6	?	3.6:1	1-4倍
エスペランザ	30	0.62	0.3	2-4	4:1	1.5-2倍

ものである(写真28-31)。初生鉱の品位は低かったと推定されているが(第3表)、鉱化範囲の広さと二次濃集度(5-8倍)が高かったために、巨大な鉱床となっている。

同様に高い濃集度を持つものはサンタリタ、レイ、シルバールなどで、いずれも黄鉄鉱量が多い特徴がある。そのほか、割目密度、母岩の種類(石灰質岩は好ましくない)、少ない中でも適当な雨量、地形条件、地質時代を通じての複数回の富化作用などが二次富化鉱体を形成する重要な要因である。

最初の大規模選鉱場であるモレンシ選鉱場は1942年に、メットカーフ選鉱場は1974年に建設され、以後最盛期には両者併せて14.8万トン/日の鉱石を処理し、年間20万トンの銅生産能力を保持してきたが、メットカーフ選鉱場は1994年に稼働を中止し、モレンシ選鉱場は2001年3月に閉鎖された。従ってモレンシ鉱山は現在ではリーチング銅のみを生産している。

モレンシにおける特色は安価にリーチング用の鉱石と供給するための新システム(In-Pit Crushing and Conveying system, IPCC)の採用である。これは採掘場で一次破碎をし、幅1.5mと1.8mのコンベアが時速16kmのスピードでリーチング場へ鉱石を搬出するものであって、採掘のコストダウンに一役買っている。リーチングはダンプリーチングが一般的で、低品位酸化鉱・硫化鉱に適用される。ほかに酸化銅鉱に適したバッチリーチング、多孔質酸化鉱用のヒープリーチングなどがある。

浸出液からの銅の回収手段としては、古くはスクラップ鉄を用いたセメンテーションが行われたが、今では溶媒抽出法が採用されている。この方法で

は、銅を溶解している浸出液を抽出剤及びモディファイアを希釈剤に溶かした有機相と混合・接触させる。銅イオンは抽出試薬と反応して、水溶液には溶け難く、有機相に溶解する化合物を生成し、浸出液から有機相へ移行する。溶媒相に抽出された銅は、次の逆抽出工程で酸性水溶液相に取り出され(エネルギー資源学会, 1996), 最終的には電解採取によって金属銅となる。銅の浸出, 溶媒抽出による濃縮及び浄化, 電解採取のプロセス, を含めてSX-EW(溶媒抽出-電解採取)プロセスと呼ばれるが, その銅生産が遂にモレンシを代表するものとなった。SX-EWプラントは1987年に建設され, 1990年, 1992, 1994, 1995年に順次拡大された。このプラントにより現在年間37.2万トンの銅が生産されている。

7. むすび

アメリカ合衆国南西部のポーフィリー型銅鉱床は, 現在の不況下で稼働率は若干低下しているものの, 依然として最重要の銅供給源である。この地域の鉱床は前報(石原, 1970)でも強調したように二次富化作用により稼行品位に達した特色がある。二次富化作用は初生鉱体の黄鉄鉱が降雨により硫酸と化し黄銅鉱を分解してCu²⁺の下降をもたらす。深部で再び還元されることにより輝銅鉱として晶出するものである。

銅資源の採掘・消費と共に, ポーフィリー型銅鉱床においては深部の初生鉱体への移行と, モレンシに見たように表成二次富化低品位鉱を処理の合理化により活用することが考えられる。アリゾナからペルー(石原, 2001), チリ北部にかけての半乾燥~乾燥地帯では, 後者がまだ重要な可能性を秘めているものと考えられる。

注1) ララマイド期: ロッキー山脈東部の変形をもたらしたララマイド造山運動に由来する。白亜紀後期-第三紀暁新世末, ワイオミング, コロラド州の変型するララマイド層が語源である。火成活動ではビュート鉱床を伴うボールダーバソリス, アリゾナ州のポーフィリー型銅鉱床を伴う花崗岩質貫入岩類などが著名。

注2) タクタイト: AGIのグロウサリー(Jackson, 1997)によると, 炭酸塩岩の接触変成作用, 交代作用などによって生じた石灰質珪酸鉱物集合体, 柘榴石, Fe輝石, 緑簾石, 珪灰石, スカポライトからなりスカルン

と同義とされているが, 適用されたアメリカ南西部の例から見ると, スカルンと熱水性交代鉱床からなり, 一般のスカルンより浅成の鉱床である。

注3) テュムストン: 墓石の意, エド・シーフェリンの探鉱キャンプ地。彼が守備隊をやめてこの地で鉱山業を始めようとした時, 友人達は一斉に“あんな危険な所で事業を起こすとは墓石となるだけだ”と警告したこと由来する。

文 献

- Bushnell, S. E. (1988): Mineralization at Cananea, Sonora, Mexico, and the paragenesis and zoning of breccia pipes in quartzofeldspathic rock. *Econ. Geol.* v.83, 1760-1781.
- エネルギー・資源学会編(1996): エネルギー・資源ハンドブック. 1367p.
- 石原舜三(1969): ポーフィリー-銅-鉛-亜鉛入門(I) 実例篇 260p., ラテイス社.
- 石原舜三(1970): ポーフィリー-銅-鉛-亜鉛入門(II) 総括篇 252p., ラテイス社.
- 石原舜三(2001): ペルー南部のポーフィリー銅鉱床. *地質ニュース*, no.563, 6-24.
- 石原舜三・渡辺 寧・内藤 耕(2002): Cordilleran Exploration Roundup 2002 -特にアジアの鉱物資源ポテンシャル評価について. *地質ニュース*, no. 571, 46-59.
- Jackson, J. A. (1997): *Glossary of geology*, 4th ed. American Geol. Inst., 769p.
- Meinert, L. D. (1982): Skarn, manto, and breccia pipe formation in sedimentary rocks of the Cananea mining district, Sonora, Mexico. *Econ. Geol.* v. 77, 919-949.
- Moolick, R.T. and Durek, J.J. (1966): The Morenci district. In Titley, S. R. and Hicks, C. L. ed. (1966) *Geology of the porphyry copper deposits-Southwestern North America*. Univ. Arizona Press, 221-231.
- Titley, S. R. ed. (1982): *Advances in geology of the porphyry copper deposits, Southwestern North America*. Univ. Arizona Press, 560p.
- Titley, S. R. ed. (1994): An abridged overview of some features of porphyry copper deposits in the American Southwest. *U. S. Geol. Surv. Circular* 1103A, 15-23.
- Titley, S. R. ed. (2002): Some features of tectonic history and ore genesis in the Pima mining District, Pima County, Arizona. In *Guidebook for Southwestern USA and Sonora porphyry copper deposits-An integrated approach field trip*, SEG.
- Titley, S. R. and Hicks, C. L. ed. (1966): *Geology of the porphyry copper deposits-Southwestern North America*. Univ. Arizona Press, 287p.
- Titley, S. R. and Marozas, D. C. (1995): Processes and products of supergene copper enrichment. *Arizona Geol. Soc. Digest*, v.20, 156-168.

ISHIHARA, Shunso (2003): On the SEG's Global Exploration 2002: Integrated Methods for Discovery, and present status of porphyry copper mining in the Southwest North America.

<受付: 2002年7月12日>