

高品位型インジウム資源の現状

石原 舜三¹⁾・村上 浩康²⁾

1. まえがき

インジウムの供給源としては、^{れっか}鉍脈型や裂罅規制型などの恐らく陸上火山の地下で生成した火成鉍床、及び海底火山に伴って海底で生じた黒鉍型の塊状硫化物鉍床などがある。前者は高品位鉍を産出し、後者は低品位鉍を産するが大規模である。鉍業的にはインジウム鉍物よりも量的に多い黒色閃亜鉛鉍(第1図)、次いで銅硫塩鉍物(salphosalts)などに微量に含まれるものから回収される。もともと日本の豊羽鉍床を除き、インジウムの産状は詳細に研究された事例がないと言っても過言ではない。ポルトガルのノボシュコルボ鉍床(石原, 2005b)などの新産地のインジウム鉍物学や産状の研究が、今後に期待される。

インジウムの新しい用途が開け、価格が高騰したのは2004年から2005年にかけてであった。インジウムは少量しか使われないが、現代電子産業における重要性・将来性に鑑み、その供給面の背景について豊羽鉍山を中心に紹介した(石原, 2005a)。ここ数年は不況もあって、供給不足も解消し価格も安定しているが、インジウムはもともと希少金属であるから天然における産出量が少ない。幸いにも“都市鉍山”からリ

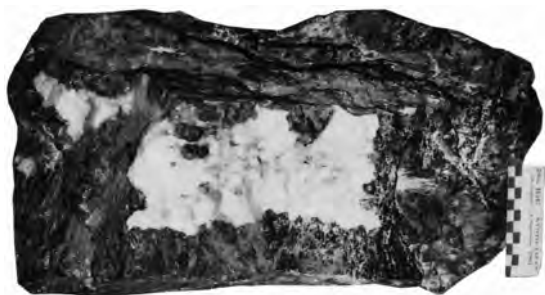
サイクルしやすい特性があり、窮状を助けている。前報から5年目を向かえ、今後の初生資源探査の一助とすべく、特に高品位であった豊羽鉍床、ポリビアのサン ヴィセンテ鉍床などを例にインジウム資源の濃集環境について考察してみたい。

2. 価格・用途と生産

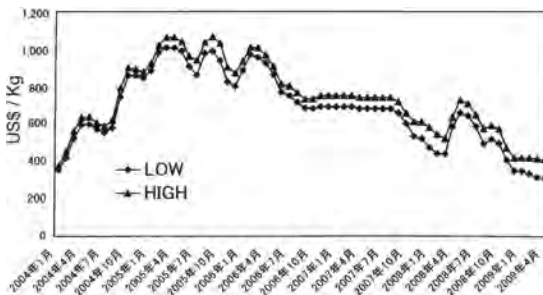
インジウムの日本の全使用量は2005年634トン(前年度比117%)、2006年が905トン(前年度比143%)、2007年も905トン、2008年は860.3トン、以後減少傾向にある。従って価格面でも最近では低下傾向にある(第2図)。2008年の使用量のうち、リサイクル起源量が517.8トン(60.2%)、バージン起源量が342.7トン(39.8%)、我が国の消費量は最近では、リサイクル起源のインジウムに大きく依存している。

消費目的は、ITO(酸化インジウム錫)用が750.5トン(87.2%)で非常に大きく、はんだ・接点材料・ボンディング用途・ヒューズ・歯科用合金・化合物半導体、電池材料などのその他目的がわずかに12.8%である(松坂, 2009)。

2008年のインジウムの国内生産は、亜鉛精鉍から



第1図 ポトシのホテルで見たポトシ鉍山産黒色閃亜鉛鉍の巨塊。中心の白色鉍物は方解石。



第2図 最近のインジウム価格の推移(松坂, 2009による)。

1) 産総研 特別顧問
2) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: インジウム, 豊羽鉍山, ポリビア, 多金属型鉍床, 火山性環境

抽出される“バージン”が70トン程度で前年と横ばい、輸入量は341.8トンで、2007年の93%であった(松坂, 2009)。豊羽鉱山の2005年3月の閉山以降、国内産亜鉛精鉱は存在しないから、このバージン量は輸入亜鉛(銅)精鉱から回収されたものである。日本の亜鉛精鉱の主要な輸入先としてはオーストラリア・ペルー・アメリカ合衆国・ポリビア・メキシコなどであるが、インジウム含有量は公表されていない。

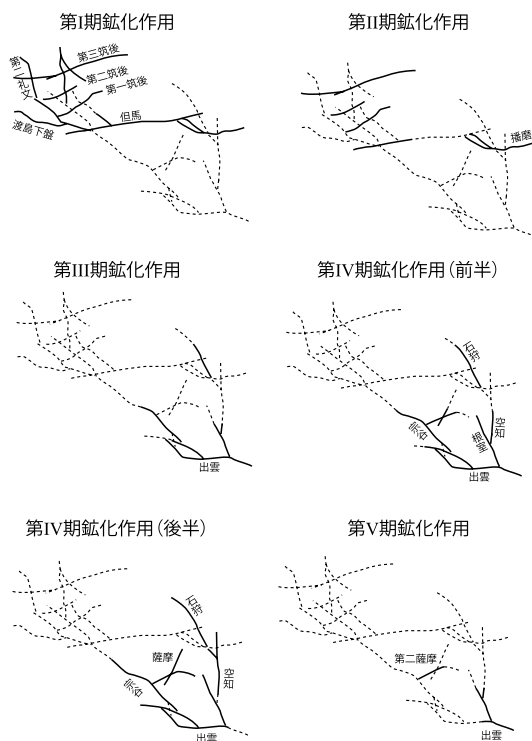
2008年のインジウム輸入量は341.8トン(2007年比93%)と大きく、更にその60%に相当する225.9トンはKorea Zincによるバージン生産及びITOスクラップからの回収と伝えられている。韓国のバージン生産は後述するポリビアのサンヴィセンテ鉱山産の亜鉛精鉱の輸入に主として依存している。この鉱床のインジウム含有鉱物については既にSugaki *et al.* (1984)などの詳しい報告がある。

輸入国の第2位はカナダ(134.4トン、全体の14.0%)、第3位は中国(57.0トン、同6.6%)であり、カナダの供給源は塊状硫化物鉱床からの亜鉛精鉱であり、中国では華南の都竜鉱床(石原・村上, 2007)である可能性が高い。ポルトガルのノボシュコルボ鉱床の銅鉱石からはインジウムはまだ回収されていない。

3. 高インジウム多金属鉱石の特徴

インジウムは単独鉱床としては存在せず、常に有価微量成分の一つとして天然に産出する。インジウムを多く含む鉱石は単独のインジウム鉱物、含インジウム銀・錫硫化物・錫石などを多く含むが、更に閃亜鉛鉱の主成分を置換するインジウムが多いものから構成される。鉱業的には、量的に多い閃亜鉛精鉱、一部銅精鉱から分離・抽出して生産される。そのような鉱床は豊羽・明延・生野・足尾など日本に多く存在したが、現在では全て閉山された。このうち豊羽鉱床が最も高品位であって、出雲樋では脈幅平均品位で1,000 ppm Inに達する鉱石が広く分布していた(吉江ほか, 1986)。

豊羽鉱床の地質的特徴は“火山性環境”である。鉱脈の母岩は主として中新世の苦鉄質火山岩類であり、近くには花崗岩類は見られず中新世と思われる石英斑岩岩脈がわずかに産出するのみで、明延・生野鉱床と比較して岩脈数が非常に少ない。この点は花崗岩類が深部に潜在する豊富含錫鉛亜鉛鉱床が



第3図 豊羽鉱床における第I～V期鉱化ステージ鉱脈の分布(成井ほか, 1988)。

低いインジウム含有量を持つこと(石原・遠藤, 2009)と対照的である。火山性の鉱石はポリビアの多金属鉱床帯においても著名であり、筆者らの未公表資料では、銀採掘で著名なポトシ鉱床でハンドスペシメンではあるが、最高品位5,740 ppm Inの閃亜鉛鉱鉱石が得られている。またサンヴィセンテ鉱床では銀鉛亜鉛帯でインジウムが多く含まれる。

3.1 豊羽鉱床

多金属鉱石の鉱業的で詳細な研究は、吉江ほか(1986)・成井ほか(1988)によるものが世界で唯一ではなかろうか。彼らは引立のチャンネルサンプリングで鉱脈の平均品位を求め、回収またはその可能性がある微量成分Au, Cu, Sn, W, In, Coを微量有価成分と定義し、その鉱化時期及び空間的变化を明らかにした。

豊羽鉱床の鉛亜鉛鉱化作用はI・II・III期(以上あわせ前期)及びIV・V・VI・VII期(以上あわせ後期)に細分された。主要時期の平面分布図を第3図

鉱物		ステージ						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
閃亜鉛鉱	鉛	—			—		—	
方鉛鉱	鉛	—			—		—	
黄鉄鉱	鉄	—			—		—	
白鉄鉱	鉄	—			—		—	
黄銅鉄鉱	銅	—			—		—	
赤銅鉄鉱	鉄	—			—		—	
磁鉄鉱	鉄	—			—		—	
硫砒鉄	砒		—		—		—	
磁硫鉄	鉄		—		—		—	
黄錫鉱	錫		—		—		—	
錫石	錫				—		—	
輝石	マンガン				—		—	
輝石	マンガン				—		—	
輝石	マンガン				—		—	
毛貝石	マンガン				—		—	
Zn-In 硫化物	マンガン				—		—	
輝銀	銀	—			—		—	
自然銀	銀	—			—		—	
工銀	銀	—			—		—	
濃紅銀	銅				—		—	
ダイヤフォライト	銅				—		—	
輝安銅銀	銅				—		—	
輝安銀	銀	—			—		—	
脆銀	銀	—			—		—	
ホカルタイト	銅				—		—	
カンフィルタイト	銅				—		—	
Ag-In 硫化物	銅				—		—	
石	マンガン	—			—		—	
菱マンガン珪酸塩	マンガン	—			—		—	
方解石	珪酸塩	—			—		—	
緑泥	珪酸塩	—			—		—	

第4図 豊羽鉱床における鉱化ステージ別の鉱石鉱物 (吉江ほか, 1986)。

に、各時期の構成鉱物を第4図に示した。インジウムはII・III・VI・VII期で10ppmと少なく、第I期で10-60ppmとやや多く、第IV・V期で300-400ppm、局部的に1,000ppmと最も多く含まれる。東西系の出雲樋では500ppm以上の高品位部が270-400mL付近を東西に走り、南北系の空知樋では、同様なポナザが柱状に分布して見られる(第5図: 吉江ほか, 1986)。

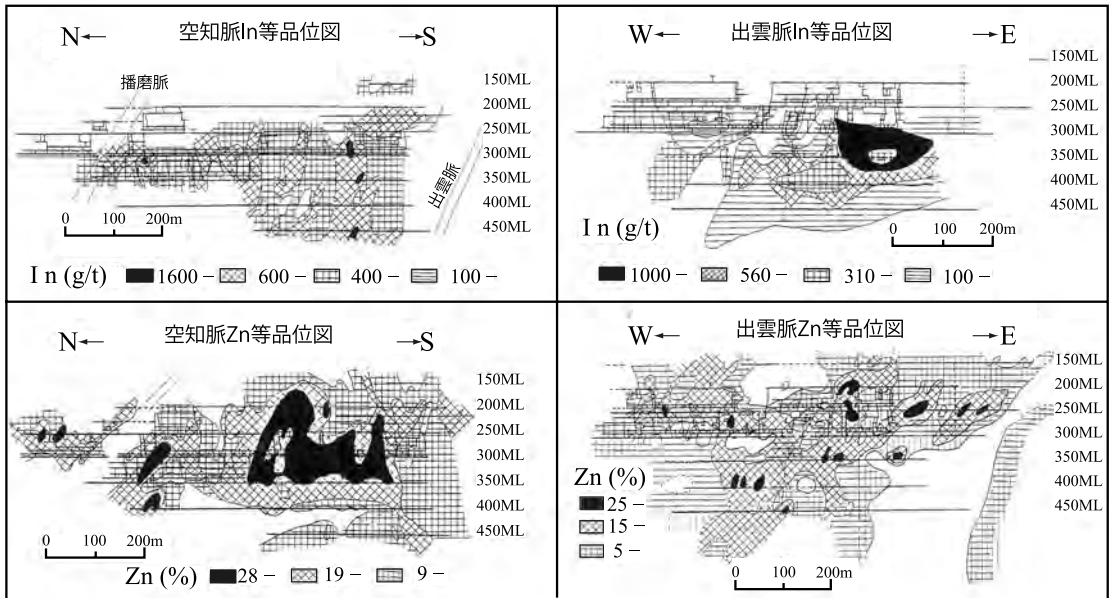
銀鉱物としては、第I期に輝銀鉱・自然銀・輝安銀鉱などが含まれる。第IV期と第V期には黄錫鉱・錫石の錫鉱物に加えて、銀四面銅鉱・濃紅銀鉱・ダイヤフォライト($Pb_2Ag_3Sb_3S_8$)、輝安銅銀鉱(polybasite, $(Ag, Cu)_{16}Sb_2S_{11}$)、輝安銀鉱(miargyrite, $AgSbS_2$)などの銀・アンチモン鉱物が含まれる。インジウム鉱物は第IVとV期鉱脈に、Zn-In硫化物($CuZn_2InS_4$)、Ag-In硫化物($AgInS_2$)、インジウム銅鉱($CuInS_2$)、櫻井鉱($(Cu, Fe, Zn)_3(In, Sn)_4$)として産出し、また閃亜鉛鉱にも鉄を置換して1.27%含まれる(Ohta, 1989)。第I期鉱脈の弱異常インジウムの存在状態については明らかでないが、銀鉱物との

関連性が予想される。

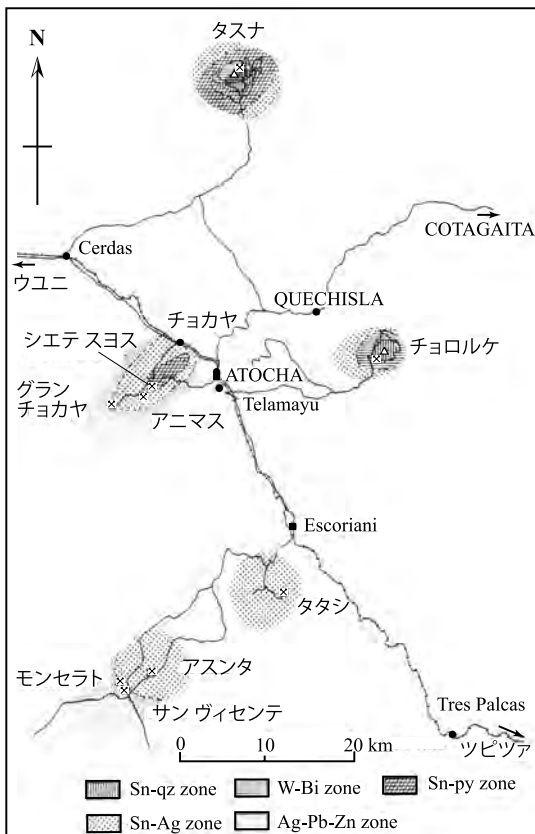
以上のように豊羽鉱床では錫鉱物もさることながら、多数の銀鉱物と共存してインジウム鉱物が産出する。ポリビアにおいても、ポトシ鉱床は最初銀鉱物を採掘し、近年になって錫を採掘した。一方、現在インジウム鉱石を出鉱しているサン ヴィセンテ鉱床は鉱床自体が銀鉛亜鉛ゾーンに位置しており、ここでも銀鉱化作用とインジウム濃集との関係が示唆される。

3.2 サン ヴィセンテ鉱床

前述のサン ヴィセンテ鉱床はポリビア南部のケチスラ地方にあって(第6図)、オールドビス紀砂岩・頁岩互層地帯にある。南北系のサン ヴィセンテ逆断層に切断されて西側に陥没盆地が生じ、赤色の第三紀礫岩類が分布してこれはサン ヴィセンテ層と名づけられた。これに東西系急傾斜のデイサイト岩脈(幅10m)が貫入する。鉱脈も東西系、北か南に急傾斜であり、厳密にはN70-85°W, N50-65°W, N55-65°Eに分けられる。N70-85°W系はGuerniaなど7鉱脈からな



第5図 豊羽鉛床，空知脈と出雲脈におけるInとZnの等品位図(吉江ほか, 1986)。

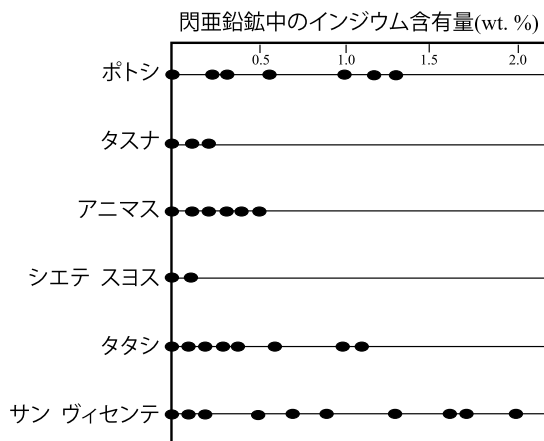


第6図 ケチスラ地方の鉛床に見られるメタルゾーニング (Sugaki et al., 1984)。

り，そのうちの6 de Agosto脈は走向延長1,500m，Deseada脈は1,250mなどと大規模である。N50-65° W系はAdelaなどの4鉱脈，N55-65° EはArtolaなどの4鉱脈からなるが，その規模は小さい(Sugaki et al., 1984)。

サン ヴィセンテ鉛床の主要な鉛石鉱物は閃亜鉛鉛・方鉛鉛・四面銅鉛であり，次いで黄銅鉛・黄鉄鉛・毛鉛とやや特異である。付近の鉛床では錫帯を中心として，錫銀帯や銀鉛亜鉛帯が分布するが(第6図)，サン ヴィセンテ鉛床では錫鉛物が発見されていないので，銀鉛亜鉛帯に区分されている。このDeseada脈でロケサイトが発見されている(Sugaki et al., 1984)。また閃亜鉛鉛中のインジウム含有量もボリビアの鉛石で最も高いものに属する(第7図)。筆者らの最近の研究によると，ポトシ鉛床の閃亜鉛鉛も同様に高いインジウム含有量を持ち，かつ櫻井鉛も存在する可能性が高い(Ishihara et al., 2010)。すなわち銀鉛物の多産とインジウム濃集との関係が示唆される。

鉛山所有者のPan American Silver社のホームページによると，現在の採掘量は250トン/日，2008年の鉛石処理量は93,591トン，銀875,000オンス(27,213kg)，亜鉛1,989トン，銅150トンであった。逆算すると，品位は291ppm Ag，2.1% Zn，0.16% Cuである。鉛量



第7図 ボリビア産閃亜鉛鉱中のインジウム含有量。Sugaki *et al.* (2008) に筆者らのポトシ分析値を追加。

としては Proven + Probable = 2,447,247 トン (Ag 410 g/t, Zn 3.66%) を計上しており、含まれる金属量は銀 10.0 トン、亜鉛 89,569 トンである。インジウム品位あるいは含有量については公表されていない。

4. 今後の展望

日本のインジウムの利用は今や“都市鉱山”に大きく依存するものの、それに至るためにはやはり“天然資源”からの供給が欠かせない。USGS Mineral commodities によれば 2009 年のインジウム生産量は、主に鉱石から生産している国として、中国 300 トン、カナダ 50 トン、ペルー 20 トン、ロシア 12 トン、ブラジル 10 トン、輸入精鉱から回収している国の生産量として、韓国 85 トン、日本 60 トン、ベルギー 30 トンが計上されている。

これらの原鉱石を推測すると、中国は主に華南の堆積岩類地域割目規制型の錫含有鉛亜鉛鉱床 (大廠・都竜など: 石原・村上, 2008), ごく少量が北部中国の堆積岩類中の含錫鉛亜鉛鉱脈 (石原ほか, 2006) に由来すると思われる。ベトナム北部の同様な堆積岩類中の含錫鉛亜鉛鉱床にも高いインジウム含有量を持つものがあり (石原ほか, 2008), その精鉱は中国に輸出されているので含まれるインジウムは中国で回収されているかもしれない。しかし含錫鉛亜鉛鉱床でもスカン型の場合にはインジウム異常は認められず (石原・遠藤, 2009), 豊羽鉱床で見たごとく、“火山性

環境”が必要である。その火山活動は基本的にはチタン鉄鉱系マグマに由来するため還元的であり、火山性のため若干酸化的となる。豊羽鉱床では逆に酸化的マグマが基盤の含炭素堆積岩類と反応して fO_2 の低下を招いた (Ohta, 1995)。

ペルーではボリビア多金属帯の北方延長部の鉛亜鉛鉱脈あるいはマント型鉱床から得られているものと思われる。このペルーからボリビア多金属帯を経てアルゼンチンへと続く鉱化ゾーンは世界で最もインジウムを濃集しているものと思われ、韓国・日本・ベルギーなどのインジウム金属の原精鉱は主にこの地域の鉱床に由来すると思っただけであろう。この多金属型鉱床を形成した鉱液は亜鉛に富み、かつ錫のみならず、銀、更には銅が多く含まれている必要がある。その鉱液はチタン鉄鉱系の火山鉱化帯で発生した可能性が高く、そのような地域の探査活動においては鉱石のインジウム含有量を検討する必要がある。

一方、一鉱床内で何処に高品位部が存在するかは非常に重要な研究課題である。豊羽鉱床では南東部の鉱液の湧口付近、すなわち深所で高品位であった。これとサンヴィセンテ鉱床のような Ag-Pb-Zn 帯との量的な関係は如何であろうか。この問題に対応するためには、まず含インジウム鉱床を発見することが必要である。

海底火山活動に伴って生成した塊状硫化物鉱床に伴うインジウムは、カナダの先カンブリア地塊 (キッドクリーク), アパラチア造山帯 (ブルンスウィックなど: 石原・村上, 2007), ロシアのウラル山地の同時期の造山帯などに限られ、カナダのサリヴァン鉱山の閉山以後、このタイプの鉱床はインジウム供給源としての地位がますます低下した。しかし、ポルトガルのネベンシュコルボ鉱床では多量のインジウムが銅鉱体中に、主として黄錫鉱・褐錫鉱 (stannoidite) と共存しており (Benzazaoua *et al.*, 2003), いま回収が検討されていると聞く。この開発規模如何によっては塊状硫化物鉱床が復権を果たす日が来るかもしれないし、またその詳細な鉱物学的研究によって濃集機構が明らかにされるであろうことを期待したい。

謝辞: この小文をまとめるにあたり貴重な未公表の情報提供を賜ったボリビア在の Drs. Osvaldo Arace, Jorge Relvas 両氏に心よりお礼申し上げます。

文 献

- Benzaaoua, M., Marion, P., Pinto, A., Migeon, H. and Wagner, F. E. (2003): Tin and indium mineralogy within selected samples from the Neves Corvo ore deposit (Portugal): a multidisciplinary study. *Minerals Eng.*, 16, 1291-1302.
- 石原舜三 (2005a): いまインジウムが面白い, 札幌市の豊羽鉱山. 地質ニュース, no.605, 46-54.
- 石原舜三 (2005b): インジウムと火山堆積性塊状硫化物鉱床, 特にポルトガルのネベシュコルポ鉱床について. 地質ニュース, no.612, 10-21.
- 石原舜三・遠藤祐二 (2009): 西南日本外帯, 豊栄鉱山産スカルン型錫硫化鉱石の微量成分, 特にインジウム含有量の評価 (短報). *資源地質*, v. 59, 157-164.
- Ishihara, S. and Matsueda, H. (2010): Chemical characteristics of the In-rich ores from the Toyoha polymetallic veins, Hokkaido, Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan* (submitted).
- 石原舜三・村上浩康 (2007): プルンスウィック 12号鉱床の現状. *資源地質*, v. 57, no.1, 51-58.
- 石原舜三・村上浩康 (2008): 華南のインジウム資源の地質的背景, 特に大蔵鉱床の成因について. *資源地質*, v. 58, 139-150.
- 石原舜三・石山大三・秦克章 (2006): 大興安嶺山脈南部のスズ多金属鉱床におけるインジウム資源の評価. *資源地質*, v. 56, 212-215.
- 石原舜三・浦辺徹郎・渡辺 寧 (2008): ベトナムの非鉄金属鉱物資源の概要. *資源地質*, v. 58, 27-36.
- Ishihara, S., Murakami, H. and Marquez-Zavalía, M. F. (2010): Potentiality of In-mineral resource in the tin-polymetallic deposits in Bolivia. *Bull. Geol. Surv. Japan* (submitted).
- 松坂裕治 (2009): インジウム. *工業レアメタル*. No.125, 116-118.
- 成井英一・吉江 隆・加藤金良 (1988): 鉱化ステージと微量成分を指針とした豊羽鉱床の探鉱. *鉱山地質*, v. 38, 99-113.
- Ohta, E. (1989): Occurrence and chemistry of indium-containing minerals from the Toyoha mine, Hokkaido, Japan. *Mining Geol.* v. 39, 355-372.
- Ohta, E. (1995): Common features and genesis of tin-polymetallic veins. *In Mineral Resources of the NW Pacific Rim* (S. Ishihara & G. K. Czamanske editors). *Resource Geology Special Issue*, no. 18, 187-196.
- Sugaki, A., Ueno, H., Shimada, N., Kusachi, I., Kitakaze, A., Hayashi, K., Kojima, S., Sanjines, O. V., Sanches, A. C. and Veralde, O. V. (1984): Geological study on the polymetallic ore deposits in the Quechisla District, Bolivia. *Sci. Rept. Tohoku Univ. 3rd Series*, v.XVI, 37-129.
- Sugaki, A., Kitakaze, A., Shimada, N., Ueno, H. and Kusachi, I. (2008): Indium bearing ores from the xenothermal deposits in Bolivia. *Abstract Issue for Annual Mtg. Mineral. Sci. Japan at Akita Univ.*, p.242.
- 吉江 隆・成井英一・加藤金良 (1986): 豊羽鉱床の生成過程と微量有価成分の分布. *鉱山地質*, v. 36, 179-193.

ISHIHARA Shunso and MURAKAMI Hiroyasu (2010): Present understanding on the high-grade indium resources.

<受付: 2010年4月2日>