

# パキスタンのクロムと白金

中川 充<sup>1)</sup>・Said Rahim Khan<sup>2)</sup>・星野健一<sup>3)</sup>・Rehanul Haq Siddiqui<sup>2)</sup>・  
佐野 栄<sup>4)</sup>・Ibrar-ul-Hasan Khan<sup>2)</sup>

## 1. はじめに

ヒマラヤ山脈を擁するパキスタン—そこには6,000mを越える山々が連なる幾重もの山脈があります(写真1)。これらはインドがユーラシア大陸に衝突したときに寄った地球の皺なのです。世界最高峰を含むだけあって、皺が深いだけでなくアカギレしている所もあったりして、地球の中身が地表に顔を出しています。そして、その中身には地表付近に希な鉱物資源も潜んでいます。これらのことを、少し科学的に表現してみましょう。

私たちが暮らしている地球のほとんどは地殻と呼ばれる薄い(数~数10km)皮に覆われています。地球の半径は約6,400kmなので、卵とその殻の関係よりまだ薄いこととなります。モホ面と呼ばれる物性の変わる所を境にした地殻の下、卵でいえば白身の部分をマントルといい、地球全体の体積の8割を占めています。そのマントルは、超苦鉄質岩類とまとめられる鉄やマグネシウムに富んだ重い岩石で出来ており、地殻にはごく少ないクロムや白金を含む鉱物が部分的に濃集しているのです。

これらの元素は高温まで安定なため、鉱床となるように濃集する作用もマグマから岩石が作られるのと同じように高温で起こった出来事です。そのため、正マグマ性鉱床と呼ばれ、地殻でできる他の鉱床とは違う種類の検討が必要になってきます。ここでは、地球科学分野での技術協力の一環として行われた、マントル起源の貴重な資源を見つけた過程についてその数コマを紹介します。



写真1 上空から見た世界の屋根。地質科学研究所のあるパキスタンの首都イスラマバードから日本への直行便は北京経由の週一便のみだが、ヒマラヤ山脈の上を越えるルート。幾重にも壁を寄せたような山脈群が飛行機の窓から間近に眺められる。

## 2. クロムについて

クロムについては、既にこの地質ニュースの398, 399, 400号(平野, 1987a, b, c)で詳しく紹介されていますが、簡単に復習しておきましょう。

各元素について地殻の平均存在度を表したクラーク数のクロムは0.02(200ppmに相当)で21番目になります。一方、マントルでは一桁多い3,000ppm程度と見積もられています。クロムは色々な鉱物に少しずつ含まれますが、資源として利用できるのはクロムを主成分とするクロム鉄鉱(クロムスピネル)という鉱物だけで、数十%程度のクロム

1) 地質調査所 北海道支所  
2) パキスタン地質調査所 地質科学研究所  
3) 広島大学 理学部  
4) 愛媛大学 教育学部

キーワード: パキスタン, クロム, 白金, マントル, オフィオライト, 白金族鉱物, 資源探査, 共同研究

を含んでいます。そして、この鉱物が何らかの理由で濃集したものがクロム鉱床になります。

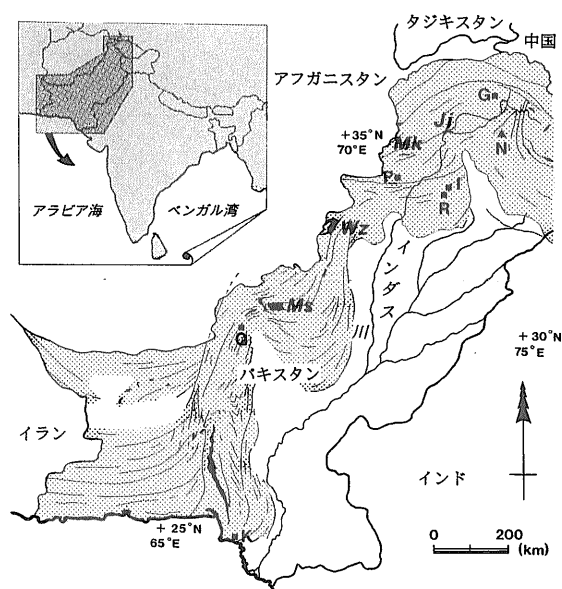
クロム鉱床には、大きく分けて層状型とポディフォーム(豆さや)型という二つのタイプがあります。層状型は大陸地殻中の大規模な貫入岩体の特定の層準に発達します。南アフリカのブッシュフェルド岩体が代表例で、生産量・埋蔵量とも桁違いに大きく、地域的には偏在していますが世界的に見れば涸渇の心配が比較的少ない資源とも言えます。成因も含めて既刊の地質ニュース479号(松本, 1994)に紹介されていますのでご覧ください。

一方ポディフォーム型は、過去の海洋地殻とその直下の上部マントルが陸上に顔を出したオフィオライト中に、小規模で不規則な形で存在します。そのため、探鉱・開発が難しく、鉱量も多くはありません。しかし、クロム成分に富むものが多いため、世界各地で生産されています。近年成因論の研究が進み、岩石が溶けた液体であるマグマと固体のマントルが地下深くで反応したために、こうした小規模な鉱床が出来るという考えが有力になってきました(Lago *et al.*, 1982, Kelemen, 1990, Zhou *et al.*, 1994). 邦文による解説は荒井(1992)を参照してください。

### 3. パキスタンのクロム鉱床

パキスタンのクロム鉱床採掘は歴史が長く、20世紀初頭には生産が開始されていました。以降時代の様々な情勢により生産量は変動しましたが、探鉱や成因論の研究は継続的に進められてきました(Ahmad, 1969, Rossman *et al.*, 1971, Ahmad and Bilgrami, 1987). その結果、主なクロム鉱床の分布は、プレート境界に沿って位置することが判ってきました。そして、その産状は蛇紋岩中のポディフォーム型を主体とし、ごく小規模な層状型を伴うオフィオライト起源のものがほとんどだと認識されるようになってきたのです。

このプロジェクトでは、海洋底起源のオフィオライトが現在では陸地になったことで出来た複雑な地質構成を総合的に研究することが一つの目的でした。その一環として、しばしばその中に含まれるクロム鉱床についても注目していました。まず佐野は、プロジェクト初期の段階で、前述したポディフォーム



第1図 パキスタンの超苦鉄質岩類(黒潰し)分布図。Asrarullah *et al.* (1979)を改作。細線は地質構造的なトレンドを、陰はパキスタンにおける衝突帯の地質が露出している部分を表す。Ms: Muslim Bagh(ムスリンバー), Wz: Waziristan(ワジリスタン), Mk: Malakand(マラカンド) Ji: Jijal(ジジャーール), G: Gilgit(ギルギット), I: Islamabad(イスラマバード), R: Rawalpindi(ラウルピンディー), P: Peshawar(ペシャワール), Q: Quetta(クェッタ), K: Karachi(カラチ), N: Nanga Parbat(ナンガパルバット山: 8,125m)。

型クロム鉱床の新たな成因論の展開を踏まえて、パキスタンのクロム鉱床の研究を総括し、基礎的な地質・岩石学的検討の重要性を強調した内容の内部報文(Proceedings of Geoscience Colloquium: PGC)を発表して啓蒙しました(Sano, 1993: PGC vol. 5)。そして、各地に点在するオフィオライトの中でも、大規模に超苦鉄質岩類が分布する西部のムスリンバー地域を星野とSiddiquiのチームが、アクセスの容易な北西部のマラカンド地域については佐野とSaid Rahimが中心になって詳しく調べてきました(第1図)。

ムスリンバー地域では、超苦鉄質岩類の原岩(写真2)やその構造が検討された結果、クロム鉱床が周辺に集中するといわれているオフィオライトのモホ面が広域的に追跡されました。また、クロム鉱床がダナイトと呼ばれるほとんどカンラン石で出来た岩石に取り囲まれていることも明らかになってきま

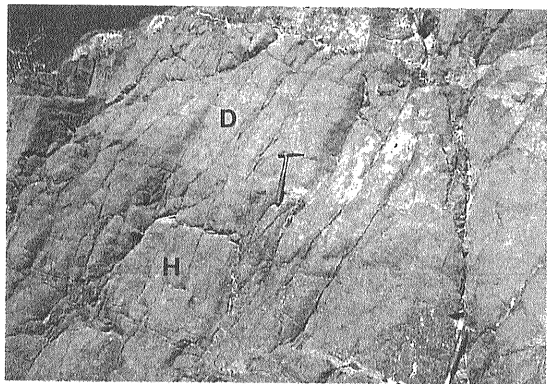


写真2 ムスリンバー地域の超苦鉄質岩。表面は風化によって赤茶けた色になる。ほとんどカンラン石からなるダナイト(D)は明るいが、斜方輝石を含むハルツバージャイト(H)はやや暗い色調になる。

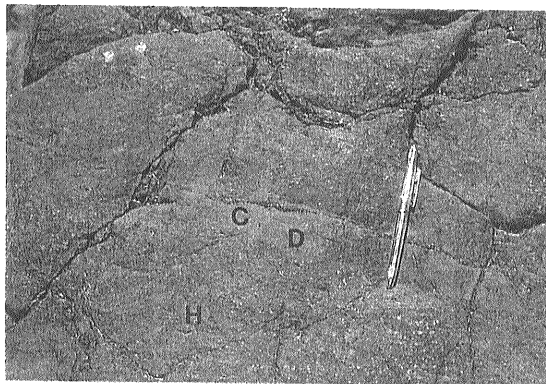


写真3 ムスリンバー地域のクロム鉄鉱層(C)の産状。ハルツバージャイト(H)中にあるダナイト(D)に挟まれていることに注意。

した(写真3)。鉱床の規模は最大でも厚さ数十mで延長が数百m程度ですが、大規模にダナイトが分布している部分に多くの鉱床が点在する規則性もありそうです(写真4)。こうした成果はその時々PGCに報告され(Hoshino and Siddiqui, 1993: vol. 5, Siddiqui *et al.*, 1994: vol. 9, Nakagawa *et al.*, 1996a: vol. 16), 到達点が明らかにされてきました。

また、鉱石に含まれるクロムスピネルの化学組成が系統的に分析され、チタンに乏しくクロムに富むものであることが分かりました(Hoshino *et al.*, 1996: PGC vol. 16)。この分析に活躍したのは、本プロジェクトで導入されたX線マイクロアナライザーという機械ですが、機械が勝手にやってくれるわけではありません。分析の前準備から実際の分析テクニック、果ては簡単な故障の修理まで、長期間に渡り研修と実践を繰り返して技術協力してきた結果、こうした分析が出来るようになったのです。もちろん、鉱石そのものの品位を分析するための技術移転も順調に進みました(Kato *et al.*, 1995: PGC vol. 10)。

マラカンド地域でもクロム鉱床を中心に調査が進められました(Kato *et al.*, 1993: PGC vol. 6, Said Rahim and Sano, 1994: PGC vol., 9)。クロム鉱体周辺の詳細な岩相分布調査に基づくと、ムスリンバー地域と同様にクロム鉱体周辺はダナイトからなることが明らかとなりました。また、クロム鉱体の母岩であるダナイトの複雑な3次元的形態が調べられて

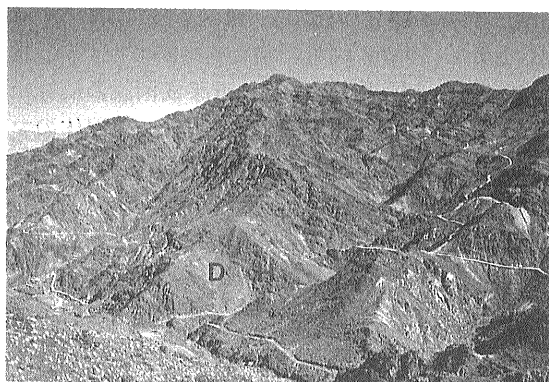


写真4 ムスリンバー地域の山容。白っぽく崩れているところにクロム鉱床が点在する。広域的にもダナイト(D)とハルツバージャイト(H)が層状に連続すること共に、厚いダナイト層にクロム鉱床が集中している点に注目。

きています。さらにこの地域では、クロムスピネルに含まれている包有物を調べ、結晶したときの状況を復元することを試みています。これによると、クロムスピネルにはたくさんの含水鉱物が包有されていることから、クロムスピネルの結晶化には含水マグマが関与したことが推定されています。

また、日本列島のような島弧の下のマントルとオフィオライトとを比較をするために、北部のジジャーラ地域の超苦鉄質岩体では、岩石学的検討やクロム鉱床の調査に加えてストロンチウムやネオジウムの同位体を用いた研究が行われました(Sano *et al.*, 1996: PGC vol. 15)。こうして、クロム鉱床の探査に岩石学的見地を踏まえた広域的調査手法の有

効性が認められ、Said Rahimによってワジリスタン地域にも調査検討が展開されています。

#### 4. 白金について

白金(プラチナ; Pt)は、指輪やルツボの材料としてなじみ深い金属元素です。しかし、Ptと物理・化学的性質の似ている5種類の元素(パラジウム; Pd, ロジウム; Rh, ルテニウム; Ru, イリジウム; Ir, オスmium; Os)があり、これらも合わせて白金族元素と呼ばれています。それらの存在量は極めて少なく、白金のクラーク数は0.0000005 (5ppb)で74番目、マントルの平均値でも8~9ppbと極めて少なく、貴金属と呼ばれる所以となっています。

これら白金族元素は、岩石の大部分を作っている珪酸塩鉱物それぞれにごく薄く含まれているわけではありません。通常直径0.1mm以下の微細な白金族鉱物と呼ばれる合金や硫化物など限られた鉱物に高濃度に含まれています。ですから、こうした鉱物が集まったものが白金鉱石ですが、それでも品位は数十g/ton (1トンの鉱石から数十グラムの白金が得られる: ppmと同じ)程度なので、見かけは普通の岩石や鉱石と変わりません。ですから、普通に顕微鏡観察をしているだけでは、なかなか白金族鉱物は見つからないのです(口絵参照)。

白金鉱床もクロムと同じように、大陸の層状岩体の特定層準に胚胎するものと、オフィオライトに伴われるものがあり、前者が生産量・埋蔵量とも圧倒的なことまで同じです。また、白金族鉱物が化学的に安定で重いため、河川などで二次的に濃集した漂砂鉱床も重要です。詳しいことは地質ニュースの既刊479, 480号(中川, 1994a, b)にまとめましたので参照してください。

さて、岩石や鉱石を細かい粉にして分析する場合、分析する試料の中にこうした鉱物が一粒入るか入らないかで、その値は大きく変わってきます。特に合金の場合は、柔らかくて粘りけがあるため(PtやPd)や、逆に極めて硬い(IrやOs)のために均質な粉末試料を作ることは大変難しいのです。そのため、白金族元素の正確な含有量をつかむためには、普通の100倍以上の試料を使わなければ信頼できる分析値が得られません。こうした貴金属分析のいわば常識も案外知られておらず、プロジェク

トに係わるメンバーの共通理解となるように普及することも私たちの役目でした。

#### 5. パキスタンの白金族元素

歴史の古いクロムに比べて、パキスタンの白金族元素に関する研究は片手で足りるほどの報告しかありませんでした。私たちのプロジェクトがはじまる前には3つの報告だけで、奇しくも我々がクロムの調査を行った地域でした。まず、ムスリバー地域では30試料、マラカンド地域からは6試料についてRh, Pt, Pdの分析値が得られました(Page *et al.*, 1979)。続いてマラカンド地域からはクロム鉱石の中からIrなどの白金族元素を含む鉄ニッケル合金が発見されました(Ahmed and Bevan, 1981)。さらにジジャール地域からは17試料の分析値が報告され、2試料からsperrylite (PtAs<sub>2</sub>)とatheneite ((Pd,Hg)<sub>3</sub>As)という白金族元素を含む鉱物が発見されました(Miller *et al.*, 1991)。しかし、これらは白金族元素を合計した最大の濃度でも数ppm以下で、直接開発に結びつくようなものではありませんでした。

貴金属を探査する場合、河川によって運搬された砂粒を統計的に調べることから始めるのが一般的です。貴金属に限らず有用金属を含む鉱物は重いので、腕掛けという重鉱物だけを集める方法で試料を採取します(写真5)。本プロジェクトでは、ジジャール地域(Suzuki and Khan, 1992a: PGC vol. 2)とギルギット地域(Suzuki and Khan, 1992b:



写真5 ジジャール地域の小沢で行った腕掛けによる重鉱物採取風景。興味津々で集まる子どもたちの数はハンマーで岩石を叩く時より圧倒的に多い。

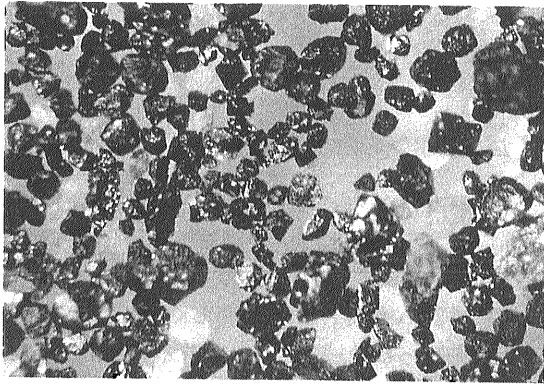


写真6 椀掛けで採取した重鉱物の実体顕微鏡写真。長辺約3.5mm。

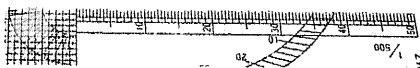
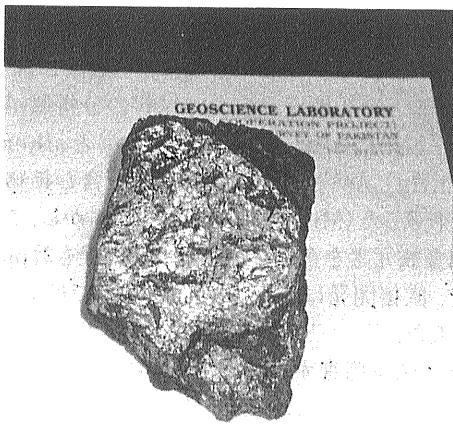


写真7 インダス川中流部の地化学探査の際得られた白金鉱石。パラジウムの品位：22.6g/ton。

PGC vol. 2) でこうした川砂(写真6)による地化学探査が行われました(鈴木ほか, 本特集号参照)。特にジジャー地域では、各地で採取した川砂のほかに、川に転がっていたズシッと重い鉱石(写真7)についても白金族元素のうちPtとPdが分析され、有望な地域が選び出されました。

とは言っても、分析された川砂そのものはせいぜい0.1ppm程度の白金族元素しか含まれていませんでした。ところが、鉱石の一つ(Jo-2)には22.6ppmに達するPdを含んでいたのです。この値が正しければ、高品位のパラジウム鉱石となりますし、鉱石の中から白金族鉱物を見つけることも夢ではありません。そこで、この鉱石を採取したSaid Rahim, X線マイクロアナライザーの得意なIbrar-

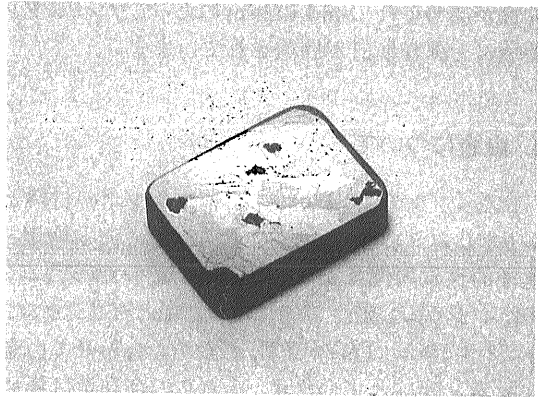


写真8 白金鉱石の研磨片。鉱石はほとんどが不透明鉱物なので反射顕微鏡で観察する。これはその観察に適切な、20×30mm程度の表面積を平滑にした研磨片。通常の岩石薄片やこうした研磨片の出来は、その後の顕微鏡観察に決定的な影響を与える。本プロジェクトでは、目的に応じてこれらを丁寧に仕上げる技術の移転も同時に行われた。



写真9 ジジャー地域のカラコルム・ハイウェイ(パキスタンと中国を結ぶ道路)とインダス川。山が迫り急峻な渓谷となっている。対岸に渡るには数百mの上り下りと数十kmの迂回が必要な場合も多い。

ulと中川がチームを組んで研磨片(写真8)を丹念に顕微鏡観察した結果、直径わずか0.006mm程のmerenskyite ((Pd, Pt) As<sub>2</sub>)という白金族鉱物を見つけることに成功しました(Khan *et al.*, 1995: PGC vol. 12; 口絵参照)。

しかしこの鉱石は川に流された転石なので、今後鉱床として開発できるかどうかを判断するためには、その鉱石が元々あった場所を探さなければなりません。そこで、Said Rahimが中心になって転石が得られた周辺を詳しく調べました(Khan *et al.*,

1996: PGC vol. 15)が、とても急で険しい地形(写真9)のせいもあって残念ながらまだ見つかりません。この鉱石は磁硫鉄鉱という磁性をもった鉱物を主体にしているので、磁気探査によって見つかる可能性もあります(Nakagawa *et al.*, 1996b)。今後の調査の進展が期待されます。

一方、ムスリンバー地域ではクロム鉄鉱のクロム鉄鉱中からIrを主体とする合金が発見されました(Hoshino and Siddiqui, 1993: PGC vol. 5)。マラカンド地域でもクロム鉄鉱の包有物を細かく調べているので、近い将来白金族鉱物が発見されるかも知れません。また、両地域のクロム鉄鉱6試料について白金族全6元素の分析が行われ(Nakagawa *et al.*, 1996a: PGC vol. 16)、普通のオフィオライトと同じようにPtに乏しくIrなどが比較的多いという結果が得られました。普通のオフィオライトと同じであれば、周辺地域に漂砂鉱床も期待されますが、両地域とも乾燥地帯なので適度な河川の発達が少ない、残念ながら容易に挽掛け出来る状況ではありませんでした。

## 6. おわりに

マントル起源の岩石が地殻中や地表付近の活動を経験して鉱床になる場合も少なくありません。そうしたものの中に今回取り上げたクロムや白金の一部だけでなく、ニッケルやコバルトなどの鉱床も期待されます。少し視点をずらせば、宝石となり得るペリドットも報告されています(Kausar and Khan, 1996)し、エメラルドも無関係とは言えません。丁寧な野外調査や顕微鏡観察に基礎を置きつつ、ターゲットに応じた柔軟な調査研究が求められているところでは、尚、パキスタンの宝石資源については、地質ニュース399号(石原・小笠原, 1987)をご覧ください。

最後になりましたが、本プロジェクトの調査研究から日常生活の細部までお世話いただいた、パキスタン地質科学研究所及び国際協力事業団の関係者各位にお礼申し上げます。また、プロジェクトリーダーの白波瀬輝夫博士とメンバーの高橋裕平博士には本小文の草稿を読んでいただき貴重なご意見をいただきました。地質調査所北海道支所の佐藤卓見技官には、鉱石の研磨片を作製していただ

ただけでなく、研修の際に技術指導も担当していただきました。記して心より感謝いたします。

## 文 献

- Ahmad Z. (1969) : Directory of mineral deposits of Pakistan, Rec. Geol. Surv. Pakistan, 15, 220p.
- Ahmed Z. and Bevan J. C. (1981) : Awaruite, iridian awaruite and a new Ru-Os-Ni-Fe alloy from the Sakhakot-Qila complex, Malakand Agency, Pakistan, Mineral. Mag., 44, 225-230.
- Ahmad Z. and Bilgrami S. A., (1987) : Chromite deposits and ophiolites of Pakistan, in Stowe (ed.) "Evolution of Chromium Ore Fields", Hutchinson Ross Pub., New York. 238-264.
- Asrarullah, Ahmad Z. and Abbas S. G. (1979) : Ophiolites in Pakistan: An introduction, in Farah A. and DeJong K. A. (eds.) "GEODYNAMICS OF PAKISTAN", Geol. Surv. Pakistan, Quetta, 181-192.
- 荒井章二(1992) : 上部マントルかんらん岩の岩石学—いかにマントル・プロセスを読みとるか—, 岩鉱, 87, 351-363.
- Kausar A. B. and Khan T. (1996) : Peridot mineralization in the Sapat ultramafic sequence, Naran-Kohistan, Pakistan, Geologica, 2, 69-75.
- Kelemen P. B. (1990) : Reaction between ultramafic rocks and fractionating basaltic magma I. Phase relations, the origin of calc-alkaline magma series, and the formation of discordant dunite, Jour. Petrol., 31, 51-98.
- Lago B. L., Rabinowicz M. and Nicolas A. (1982) : Podiform chromite ore bodies: a genetic model, Jour. Petrol., 23, 103-125.
- Miller D. L., Loucks R. R. and Ashraf M. (1991) : Platinum-group element mineralization in the Jijal layered ultramafic-mafic complex, Pakistani Himalayas, Econ. Geol., 86, 1093-1102.
- Nakagawa M., Yajima J., Khan S. R., Akram H. and Yoshida M. (1996b) : Potential applicability of the magnetic survey for prospecting of PGE in Jijal layered complex, north Pakistan, Extended Abst. Intern. Seminar Paleomagnetic Studies of Himalaya-Karakoram Collision Belt and Surrounding Continents. (Nov. 1996), Geosci. Lab., Geol. Surv. Pakistan., Islamabad, 124-127.
- Page N. J., Haffty J. and Ahmed Z. (1979) : Palladium, platinum, rhodium, concentrations in mafic and ultramafic rocks from the Zhob Valley and Daragai Complexes, Pakistan, USGS Prof. Pap. 1124-F, 1-6.
- Rossmann D. L., Ahmad Z. and Rehman H. (1971) : Geology and economic potential for chromite in the Zhob Valley ultramafic complex (Jang Tor Ghar), Hindubagh, Quetta Division, West Pakistan, Pakistan Geol. Surv. and U. S. Geol. Surv. Interim Rep. PK-50, 63p.
- Zhou M. -F., Robinson P. T. and Bai W. -J. (1994) : Formation of podiform chromitites by melt/rock interaction in the upper mantle, Mineral. Deposita, 29, 98-101.

NAKAGAWA Mitsuru, KHAN Said Rahim, HOSHINO Ken'ichi, SIDDIQUI Rehanul Haq, SANO Sakae and KHAN Ibrar-ul-Hasan (1998) : Chromium and PGE mineralizations in Pakistan

<受付: 1998年4月2日>