

モンゴル国ゴビ地域の鉱物資源

火山弧から大陸への環境変遷と鉱物資源

渡辺 寧・ジャルガラン・セレネン(産業技術総合研究所 地圏資源環境部門),
アルタンズル・バーサンドルジ(東北大学 理学部)

1. はじめに

モンゴルの地質と鉱物資源については、これまで地質ニュースでも何度か取り上げられてきたが(高橋, 2004; 石原, 2006 など), 2002年以降の金属価格の上昇(第1図)を受けて、ここ数年の鉱物資源開発の状況は急激に変化している。かつて日本の鉱山会社が「インフラが未整備で、アクセスも悪く・・・」(坂巻, 1999)と探査することさえ避けていたゴビ地域では、現在、欧米やモンゴル民族系鉱山会社がひしめき合って大規模な資源探査・開発競争を行っており、ラクダが悠々と砂漠を歩くという環境から四輪駆動車が縦横無尽に走り回る環境へと変化している。世界でも有数の規模を誇るオユトルゴイ斑岩銅・金鉱床の南ゴビ県での発見はこの急激な変化を象徴している。



第1図 2004年11月から2005年11月にかけての銅及び金の国際価格の変動(Mining Journal, 2005).

産業技術総合研究所 地圏資源環境部門では、今後、供給が逼迫すると予想される銅や希土類元素資源の調査研究を進めており、2005年10月1日から10日にかけてゴビ地域の鉱床の概査を行った。南に位置する中国地塊と北のシベリア地塊と呼ばれる大陸地殻に挟在されたゴビ地域は、火山弧から、大陸衝突帯、大陸地塊へと地質環境が変化し、その中で形成される鉱床の種類も時代とともに移り変わってきた。ここでは、ゴビ地域の代表的な鉱床を例に、この地域の金属鉱化作用がどのように移り変わってきたかについて述べる。

2. ゴビ地域の地質

ゴビ地域の北部には先カンブリア紀からカンブリ

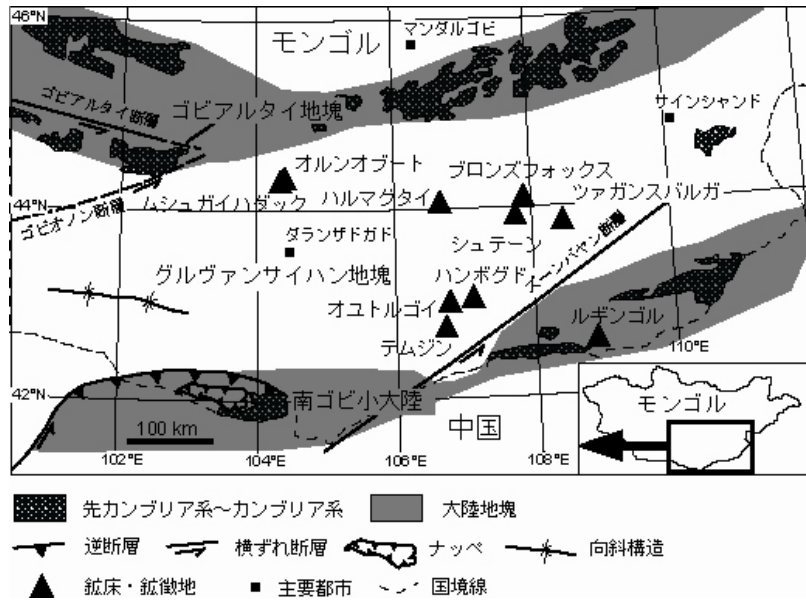
ア紀にかけてのオフィオライトと片麻岩等の変成岩類からなる東西方向に伸びたゴビアルタイ地塊が、南部には先カンブリア紀の変成岩類からなる南ゴビ小大陸と呼ばれる大陸地塊が分布する。これらの大陸地塊に挟まれたゴビ地域は、グルヴァンサイハン地塊(第2図; Badarch et al., 2002)と呼ばれ、古生代～中生代の堆積岩類・火成岩類から構成される。

この地域に分布するオルドビス系・シルル系は、主として地域の北半分に分布し、海成の泥岩および砂岩泥岩互層・石灰岩からなる。これらの堆積岩類には火山砕屑物が含まれないことから、この地域が先カンブリア系からなる大陸または非活動的な島弧の南に位置したと推定されている(Lamb and Badarch, 1997)。

デボン系～石炭系はシルル系と同様に海成堆積物が卓越するが、シルル系と異なる点は火山砕屑物が含まれることにある(第3図)。オユトルゴイ(Oyu Tolgoi)鉱床からツァガンズバルガ(Tsagaan Suvarga)鉱床(第2図)にかけて分布するデボン系はアラグバヤン(Alagbayan)層群と呼ばれており、下位からツァヴチール層、ブラグバヤン層、カルザンオボー層に区分されている。ツァヴチールは火山砕屑物に富む砂岩・シルト岩・泥岩、ブラグバヤン層は海底下で噴出した安山岩・玄武岩溶岩と火山砕屑物からなる。最上部のカルザンオボー層は安山岩・玄武岩に加えてデイサイト溶岩やデイサイト質の溶結凝灰岩を含む。これらの地層はデボン紀末期の花崗岩類・貫入岩類に貫かれ、不整合で石炭系のグルバンカラット層群に覆われる(第3図)。上位の石炭系に対して、下位のアラグバヤン層群は大きく変形・褶曲しており、デボン紀最末期にはこの地域の地質が短縮変形を受ける「短縮場」であったと推定される。上位のグルバンカラット層群は酸性凝灰岩や溶結凝灰岩、安山岩および玄武岩溶岩、前期白亜紀の海生底棲動物化石を含む砂岩・泥岩からなる(Minjin et al., 2004)。

石炭紀後期からはハンボグド複合岩体)に代表されるアルカリ花崗岩の活動が開始する(第3図; Badarch et al., 2002)。以上の地層および火成岩類の組成の変化より、この地域の地質環境は、デボン紀から石炭紀にかけて、南から北への海洋プレートの沈み込みにより海洋性島弧から成熟した島弧または陸弧に変化したと推定されている(第3図; Lamb and Badarch, 1997)。

この島弧または陸弧は石炭紀中期(Kovalenko et al., 2004)からジュラ紀中～後期(Meng, 2003)まで



第2図 モンゴル南部ゴビ地域の地質概略図。地質構造は Hendrix et al. (1996), Zheng et al. (1996), Lamb et al. (1999)に基づく。

年代 (Ma)	時代	地層	岩相 (環境)	鉱化作用	構造運動	地質環境
100	白亜紀	トランサルタイ層ほか	礫岩・砂岩・粘土・炭酸塩岩 (陸上)	● ムシユガイハダック (希土類)	地溝形成	安定大陸
150		シヤリリン層	礫岩・砂岩・粗面玄武岩・粗面デイサイト・粗面流紋岩 (陸上)		伸張帯	
200	ジュラ紀	ハマルフウエリン層	礫岩・砂岩・泥岩・炭酸塩岩・石炭 (陸上)		逆断層・褶曲	大陸衝突
250		三畳紀		● オルンオブート (金)	左横ずれ断層	
300	二畳紀			● ハンボグド (希土類)	出露岩 緑色片岩 変成作用	成熟した火山弧
350		石炭紀	アラルフラット層群 砂岩・泥岩・安山岩 (海底)	● ツァガンスバルガ (銅, モリブデン) ● オユトルゴイ (銅, 金)	褶曲	
400	デボン紀	アラグバヤン層群 砂岩・シルト岩・泥岩 (海底)	酸性凝灰岩 (陸上) 安山岩・玄武岩・デイサイト (陸上) 安山岩・玄武岩 (海底)		縮小帯	海洋性島弧

第3図 ゴビ地域の層序および鉱化作用・構造運動・地質環境の変遷概略。

引き続いた南北の大陸地殻の衝突のため消滅したと考えられている。二畳紀にはゴビ南部で緑色片岩相の変成作用が報告されているが、この変成作用は大陸衝突のために生じたと考えられている。その後、これらの変成岩は二畳紀後期のアルカリ花崗岩の貫入を受けている(Wang et al., 2004)。衝突の後期には、東北東方向の左横ずれ断層(ゴビオン、トスト、ズーンバヤン; 第2図)が形成されている。左横ずれ断層のうち、ゴビオン断層では70-95km、ズーンバヤン断層で185-235kmの変位が見積もられており、これらの断層の主要な活動時期は三畳紀からジュラ紀前期または中期と考えられている(Lamb et al., 1999)。引き続きジュラ紀前期から中期にかけて東西方向のナッペ構造を伴う逆断層が発達すること(第2図; Zheng et al., 1996)、中部ジュラ系と上部ジュラ系との間に傾斜不整合が広域的に認められ、東西系の褶曲が形成していること(Hendrix et al., 1996)は、ジュラ紀前期から中期にかけて南部ゴビ地域に南北方向の短縮変形が生じたことを示す(第3図)。

ジュラ紀後期から白亜紀前期にかけて、この地域では、これまでとは逆に地殻の伸張が起こり(Graham et al., 2001)、高ネオジウム同位体組成、低ストロンチウム同位体組成で特徴づけられるマントル起源と考えられるアルカリ花崗岩類が貫入する場に変化する(Wang et al., 2004)。また伸張により形成された地溝では玄武岩溶岩の噴出が認められる(Khand et al., 2000; Graham et al., 2001)。

ゴビ地域のジュラ系は、石炭を伴う下部-中部ジュラ系の灰色の礫岩・砂岩・粘土岩・炭酸塩質頁岩・石炭と、陸成の礫岩・砂岩・粗面玄武岩・粗面デイサイト、粗面流紋岩からなる赤色上部ジュラ系に区分され、両者は不整合の関係にある(Jargalsaikan, 1998)。トランサルタイ、南部ゴビ、東部ゴビと呼ばれる地溝状の堆積盆に分布するゴビ地域の白亜系は、古生界またはジュラ紀の赤色層を不整合で覆い、主として陸成の礫岩、砂岩、粘土、炭酸塩岩からなる(Khand et al., 2000)。ダイノザウルスを含むことでも有名である(第4図)。



第4図 オユトルゴイ鉱床で建設中の立坑から発見された恐竜の卵。

3. ゴビ地域の鉱物資源

ゴビ地域での鉱物資源の発見・開発は青銅器時代にまでさかのぼる。古代人の墓(第5図)の周りには銅を精錬した跡の slags が残されていることが多い。しかしながら組織的な鉱床探査が行われるようになるのは、コメコン加盟国による地質調査が行われた1960年以降である。この地域の鉱床は、地質環境が火山弧から衝突帯、大陸へと変遷するのに対応して、斑岩銅鉱床、造山型金鉱床、希土類元素鉱床と鉱床タイプが変化する。



第5図 約4000年前の古代人の墓。平らな岩石が並んで立っている。墓の脇には銅を精錬した時の slags が残っていた。

3-1. 成熟した火山弧の時代—斑岩銅鉱床

ゴビ地域には現在開発中の斑岩銅鉱床は存在しないものの、探査は盛んに行われており、その中にはオユトルゴイ鉱床のように開発間近のものもある。代表的な斑岩銅鉱床にツァガンスバルガ(Tsagaan Suvarga)、オユトルゴイ(Oyu Tolgoi)、ハルマグタイ(Kharmagtai)があり、その他探鉱中のものにシュテーン(Shuteen)、テムジン(Temuujin)、ブロンズフォックス(Bronze Fox)等がある(第1図)。これらの鉱床のうち、ツァガンスバルガでは360Ma (Watanabe and Stein, 2000)、オユトルゴイでは378-362Ma (Bat-Erdene et al., 2005)の鉱化年代が報告されており、この地域の斑岩銅鉱化作用はデボン紀末期に生じたことが明らかにされている。

ツァガンスバルガ鉱床は、1964年に地域の住民により発見され、ソビエト連邦が1965年から1973年にかけて地質調査を実施した。その後1977年から1982年にかけて97本の試錐が行われ、1981年から1988年にかけては坑道探鉱が実施された。その結果、粗鉱量240 Mt(銅品位0.53%、モリブデン品位0.018%)が見積もられている。この鉱床は現在、Mongolyn Alt (MAK) Corporationにより、かつて探鉱された地域の深部探鉱(~400m)が行われている

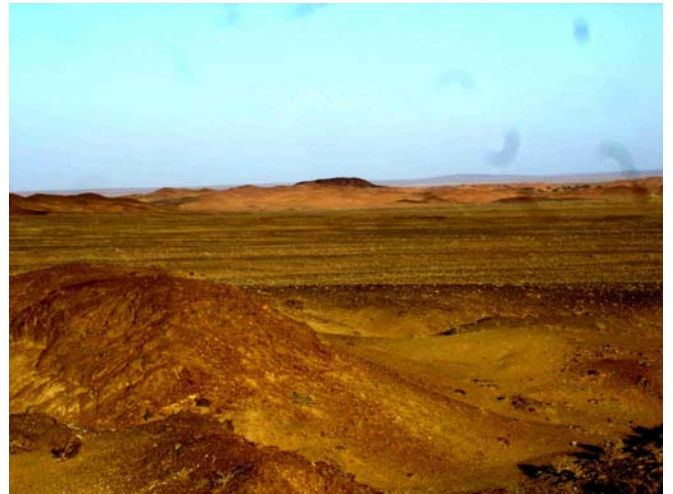
(第 6 図).



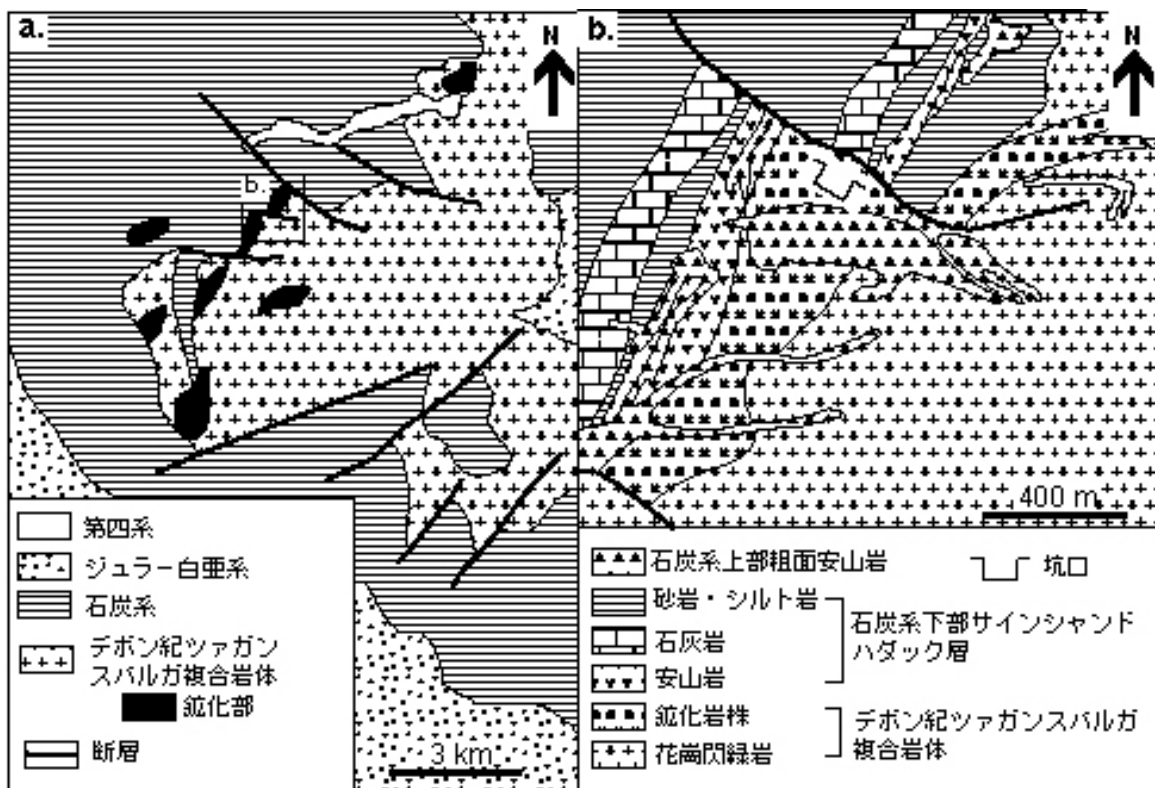
第 6 図 ツァガンスバルガで Mongolyn Alt Corporation により行われている試錐.

この地域にはデボン紀の閃長花崗岩と花崗閃緑岩からなるツァガンスバルガ複合岩体を不整合で下部石炭系のサインシャンドハダック層が覆っており、また 313Ma のモンヅナイト斑岩(Lamb and Cox, 1998)や粗面安山岩の岩脈群が鉍体を貫き、同質の溶岩がツァガンスバルガ複合岩体やサインシャンドハ

ダック層を覆っている(第 7 図, 第 8 図; Watanabe and Stein, 2000).



第 7 図 ツァガンスバルガ複合岩体遠景(写真中央の白色部). 複合岩体に累重する黒褐色の地層は石炭紀後期の粗面安山岩溶岩. 鉍化作用は複合岩体中に認められる.



第 8 図 ツァガンスバルガ地域地質図. Japan International Cooperation Agency (1992)を改変.

ツァガンスバルガ複合岩体には 7 箇所の鉍化した貫入岩が認められており、鉍化帯は地表に露出している。またツァガンスバルガの名前の由来となる塊状の石英からなる丘が分布している(第 9 図). 鉍徴地

の中心部には、カリウム長石で特徴づけられるカリウム変質帯と石英脈群が、縁辺部には緑泥石・緑廉石で特徴づけられるプロピライト変質帯が発達し、カリウム変質帯には白雲母変質が重複している(第

10 図). この鉱床を特徴づける黄銅鉱は白雲母変質帯に脈状に産出し、輝水塩鉱は鉱化帯中心部の石英脈に伴っている。地表部ではこれらの鉱石鉱物は酸化し、孔雀石[Cu₂(OH)₂(CO₃)]や黒銅鉱(CuO)に置換されている。



第 9 図 ツァガンスバルガに分布する塊状石英からなる丘。孔雀石の鉱染が認められる。ツァガンスバルガは、「白仏塔」の意味。



第 10 図 ツァガンスバルガ鉱床での花崗閃緑岩の熱水変質の産状。赤色部はカリウム変質、白色部は白雲母変質を蒙った部分。白色部に黄鉄鉱や黄鉄鉱、輝水塩鉱が認められる。

オユトルゴイ鉱床は、1980 年代にモンゴルとロシアの地質調査隊が広域地化学探査を行った際にモリブデン異常域として報告された。1996 年にマグマカップパー社の予備的調査により銅鉱化作用が発見され、1996 年に BHP 社が探鉱権を取得した。1997 年から 1998 年にかけて BHP 社は試錐探鉱を行い、粗鉱量 438Mt (銅品位 0.52%, 金品位 0.25 g/t) を見積もったが (Perelló et al., 2001), 品位の低さから探査活動を中止した。その後、アイバンホー社がオユトルゴイの探鉱権を買い取り、社運をかけて 2000 年から現在まで試錐探鉱を積極的に行い、現在では粗鉱量

1,149Mt (銅品位 1.30%, 金品位 0.47 g/t) を見込んでいる。これは、アジアではインドネシアのグラスベルグに次ぐ規模の斑岩銅・金鉱床である。アイバンホー社のオユトルゴイプロジェクトの責任者であるチャールズ・フォスター氏によると、成功の決め手は、IP 調査をきめ細かく行い、地下の鉱化帯の形を正確に描き出したことである。現在は飛行場(第 11 図)や探査キャンプ(第 12 図)も整備され、開発への準備が着々と進められている。

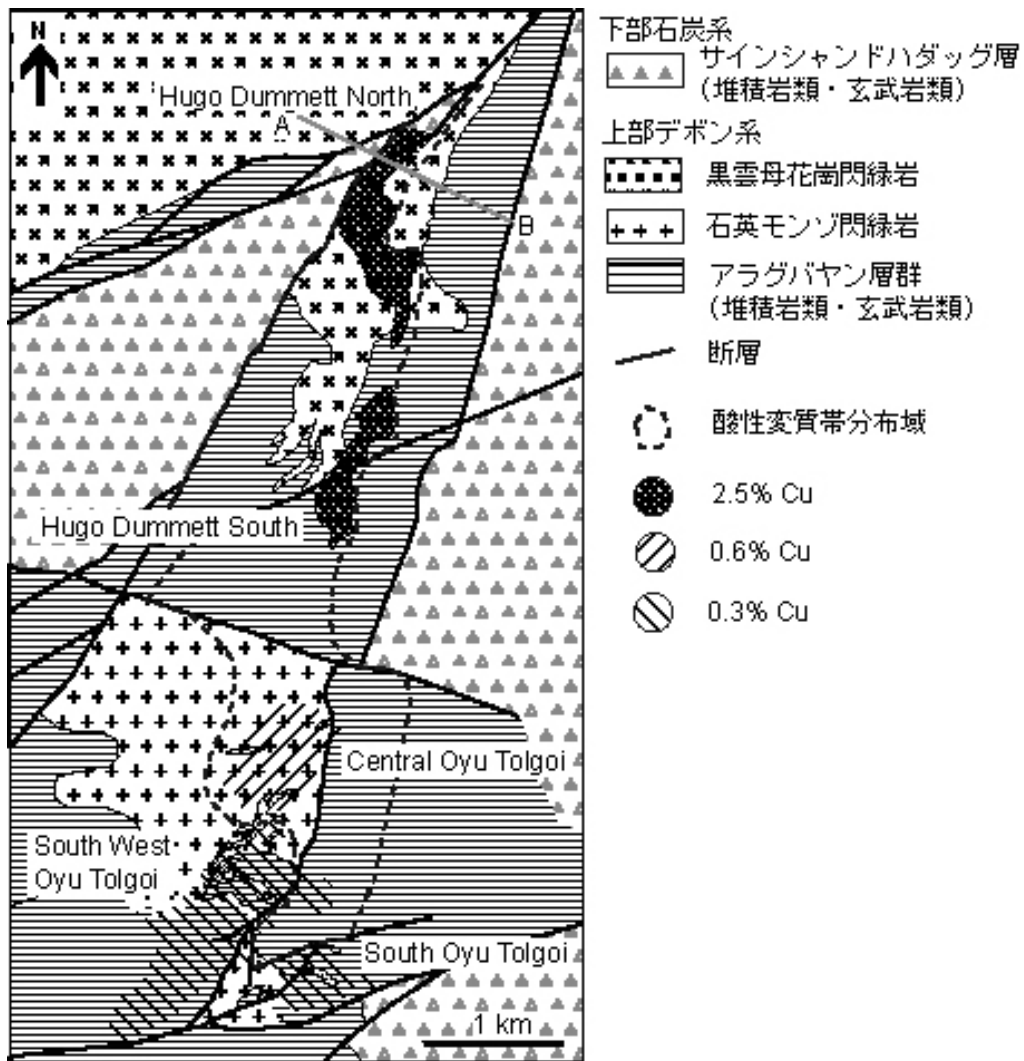


第 11 図 オユトルゴイに整備された飛行場。現在ではほぼ毎日ウランバートルとの間でフライトが運航されている。



第 12 図 オユトルゴイ探鉱地キャンプ。中にはゲルが立ち並ぶ。中央に座っているのは恐竜化石の調査に来たモンゴル科学技術大学のミンジン先生。左から 2 番目はオユトルゴイ地域の地質の生き字引、ガラムジャブ氏。現在は Ivanhoe Mining 社で働いている。オユトルゴイ鉱床の優良部の発見者で 2004 年にカナダ鉱床探査協会から国際発見賞 (Thayer Lindsley International Discovery Award) を受賞している。

オユトルゴイ地域は、南北方向の地溝中にデボン系のアラグバヤン層群が分布し、石英モンゾ閃緑岩や黒雲母花崗閃緑岩がデボン系に貫入している。地溝の外側には石炭系のサインシャンドハダッグ層が分布している(第 13 図; Bat-Erdene et al., 2005)。

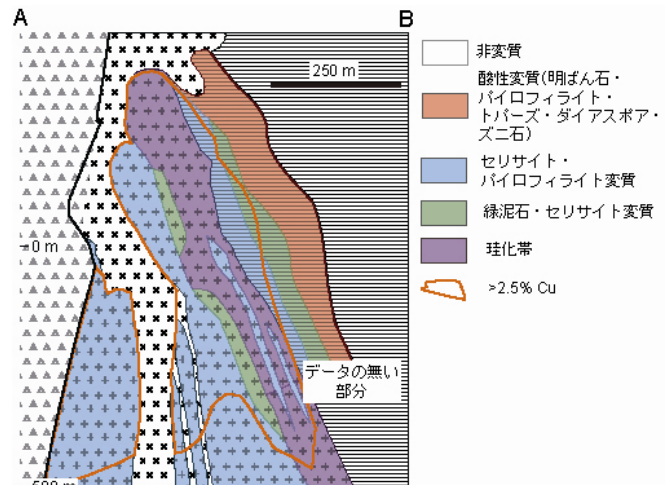


第 13 図 オユトルゴイ地域地質図. Bat-Erdene et al. (2005)を簡略化. 潜頭性の銅鉱化部は地表地質図に投影.

斑岩銅・金鉱化作用は北北東-南南西方向に貫入している石英モンゾ閃緑岩に伴われており、黒雲母花崗閃緑岩は鉱化作用後の貫入岩である。富鉱部は、北から Hugo Dummett North, Hugo Dummett South, Central Oyu Tolgoi, South West Oyu Tolgoi, South Oyu Tolgoi が 6.6km にわたって配列する(第 13 図)。Hugo Dummett North と Hugo Dummett South は連続した潜頭性鉱体である。

石英モンゾ閃緑岩の中心部は石英脈の形成に伴う珪化が著しく、斑銅鉱と黄銅鉱からなる富鉱部を形成する。その周囲にはセリサイト-パイロフィライト変質帯が形成され、石英モンゾ閃緑岩の上盤側には、蒸気卓越相から形成されたと考えられるトパーズ・明ばん石等からなる酸性変質帯が形成されている(第 14 図)。

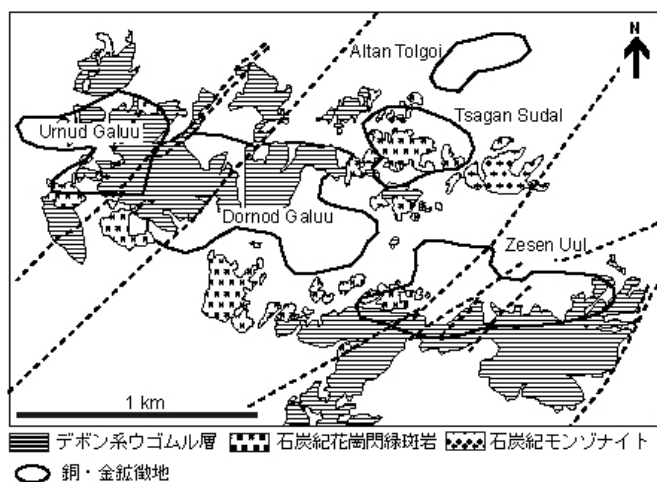
ハルマグタイ鉱床は、5 万分の 1 や 10 万分の 1 の地質調査により発見され、1976 年から 81 年にかけて物理探査や試錐探鉱が行われた。その後 1995-1999 年に Quincunx Gold Exploration 社がこの地域を探鉱し、現在は Ivanhoe 社に引き継がれている。



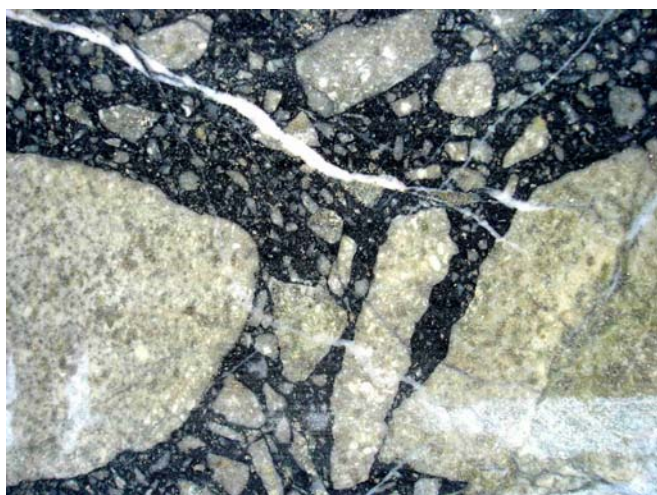
第 14 図 オユトルゴイ Hugo Dummett North 鉱体断面図. Bat-Erdene et al. (2005)を簡略化. 断面位置および岩石種は第 14 図参照.

この地域でも、デボン系の火山砕屑物を含む堆積岩類からなるウゴムル層を石炭紀のモンゾナイトや花崗閃緑斑岩が貫いており(第 15 図)、白亜紀の赤色粘土、石灰質砂岩に覆われている。この地域には斑

岩に伴って電気石を含むマグマ～熱水角礫岩が多産し(第 16 図), この地域で発見されている 6 箇所(Urnud Galuu, Dornod Galuu, Altan Tolgoi, Tsagan Sudal, Zesen Uul, Chun)の金・銅鉱徴地は, 主として電気石を含む熱水角礫岩に伴われる. 最近の流体包有物中の金属元素の定量結果(Heinrich et al., 1999)や熱水実験(Schatz et al., 2004)によると, マグマが地殻浅所に貫入すると, マグマから分別した流体は高温で塩水(brine)相と蒸気相に分別し, 金や銅はホウ素とともに蒸気相にも相当量分配されることが明らかにされている. 従って, ハルマグタイ鉱床での電気石を含む熱水角礫岩に伴う金・銅は, 蒸気相熱水により運搬されたものと推定される.



第 15 図 ハルマグタイ地域地質概略図(Ivanhoe Mining website から引用). Chun 鉱徴地は Zesen Uul 鉱徴地の東南東約 3km に位置する.



第 16 図 ハルマグタイ鉱床に産出する白雲母変質を受けた花崗閃緑岩礫を含む電気石角礫岩.

3-2. 衝突の時代—造山型金鉱床

ゴビ地域の造山型金鉱床の代表例はオルンオブート(Olon Ovoot; 第 17 図)金鉱床である. この鉱床はモンゴル中部のゴビアルタイ地塊との境界に近いグ

ルヴァンサイハン地塊北部に位置する(第 2 図). この鉱床では, 1990 年代には細々と探鉱が行われていたが, 2001 年に Mongol Gazar 社により本格的な操業が開始された. 現在は Mongol Gazar 社と Simberi 金公社が設立した Mongolian Gold Mines Company 社がこの鉱床の操業を行っており, 大規模な選鉱施設も建設されている. 平均金品位は 5-6g/t で推定埋蔵量は 40t である. 現在は地表から 100m までの表層酸化部が採掘されている.



第 17 図 オルンオブート鉱山事務所入り口.

この鉱床には現在 3 箇所の主要な鉱化帯が知られており, その 1 つであるオルン・オブート鉱化帯には 4 つの鉱体が存在する(第 18 図). 鉱床母岩はシルル系の緑色片岩および前期～中期デボン紀の閃緑岩であり, 鉱化作用は西北西—東南東または東北東—西南西方向の剪断帯に伴われる. 金は, セリサイト変質を伴う石英脈や石英細脈, 剪断帯のセリサイト帯中の砒素に富む黄鉄鉱に含まれる(第 19 図).



第 18 図 オルンオブート地域地質図(Jargalsaihan, 1996).

この造山型金鉱化作用はオルンオブートのみでなく, 大規模な剪断帯に沿って各地で認められる. このタイプの金を狙って, 社会主義の時代には全く見られなかった小規模鉱夫がゴビ各地で採掘を行っている. モンゴルでは不法で他人の鉱区内で金鉱石を

採掘する小規模鉱夫を Ninja(忍者)と呼んでいる。2000 年前後の冷害により家畜を失った遊牧民が、職業を変え忍者が増加したようである。



第 19 図 オルンオブートの含金石英脈。黄鉄鉱は酸化して赤鉄鉱化している。母岩は砂質片岩。

忍者の探査能力は驚くべきものがあり、何 10km にわたる広いゴビ砂漠の中で、わずか数 10cm 程度の金鉱脈を見事に見つけ出している(第 20 図)。忍者は、その違法性を認識しているためにあまり人と交流せず、鉱区所有者が現れるとすぐに姿を消し、人の良いモンゴル遊牧民の中でも異色の存在である。



第 20 図 忍者が金の盗掘を行っている現場。



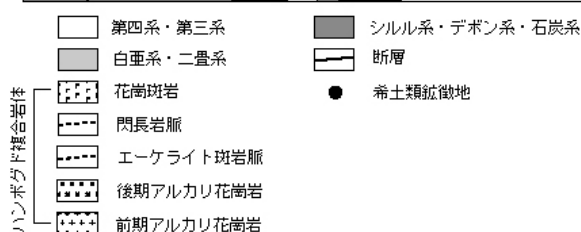
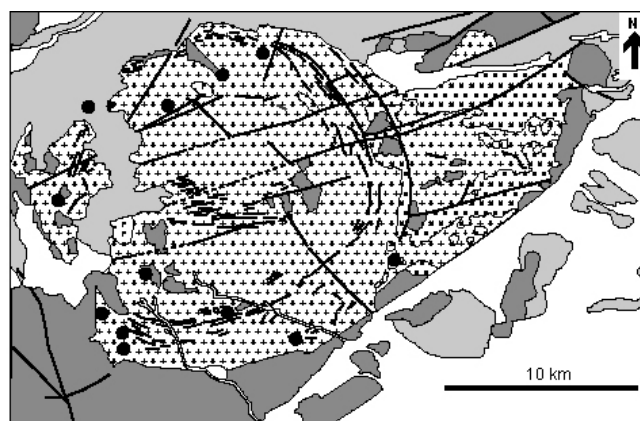
第 21 図 忍者の鉱石粉碎施設。ここで砕かれた試料はリーチングプールに運ばれる。

忍者は取り締まりから逃れるため、金の採掘現場、鉱石の粉碎所、金の回収所を分別している。金の採掘現場では、剪断帯に胚胎する高品位粘土脈や石英脈を手堀り採掘している。粉碎施設では直径 3 m ぐらいの円柱形の容器の中で鉄の車輪を回して鉱石の粉碎を行っており(第 21 図)。回収所では数 m 四方のプールをいくつか作り、シアン溶液を使ったヒープリング法で金の回収を行っている。

3-3. 大陸の時代—希土類元素鉱床

ゴビ地域に分布するハンボグド、ルギンゴル、ムシュガイ・ハダック希土類元素鉱床はいずれもアルカリ深成岩に伴われており、ハンボグドはペグマタイト、ルギンゴルとムシュガイ・ハダックはいわゆるカーボナタイト鉱床である (Kovalenko and Yarmokyuk, 1995)。

ハンボグド鉱床は、直径約 30km のハンボグドアルカリ花崗岩体に胚胎する。この花崗岩体からは石炭紀最末期(296Ma; Amar-Amagalan et al., 2005)の年代が報告されている。ハンボグド花崗岩体は 2 時期に区分されるアルカリ花崗岩からなり、その後各種の岩脈が花崗岩体に貫入している(第 22 図)。アルカリ花崗岩はカリウム長石、斜長石、石英、アルカリ角閃石、エジリン輝石からなり、螢石、燐灰石、ジルコン、スフェーン、褐廉石を含む。ハンボグドアルカリ花崗岩の全岩分析によると、この岩体はルビジウムとカリウムに富み、ストロンチウムやユーロピウムに乏しく、コンドライトで規格化した希土類パターン図では、軽希土類に対して比較的、重希土類に枯渇しないパターンを示す。

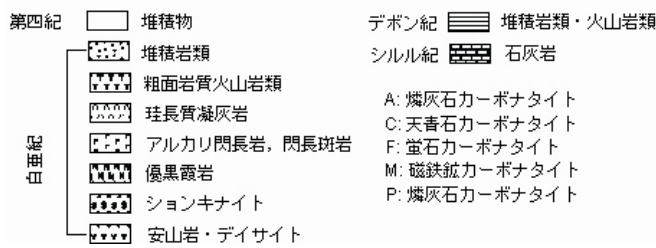
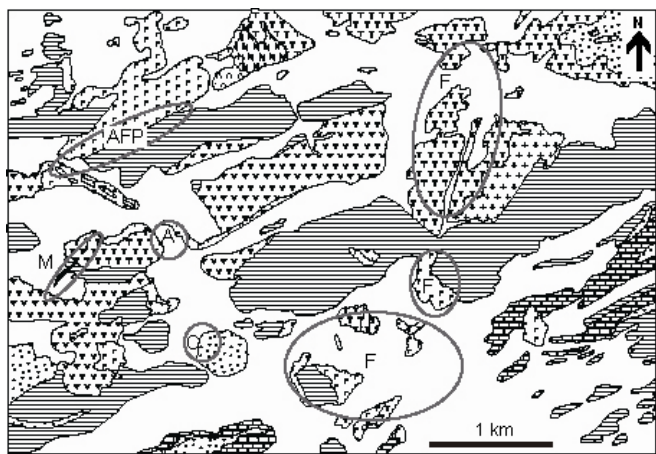


第 22 図 ハンボグド地域の地質図(Burenhun et al., 1991)。

希土類元素は主として花崗岩体中のペグマタイトに濃集し、ジルコニウムを含む珪酸塩鉱物であるエルピダイト $H_6Na_2Zr(SiO_3)_6$ やアームストロンガイト $CaZrSi_6O_{15} \cdot 2.5H_2O$ 、ニオブ系希土類鉱物であるシンチサイト $Ca(Nb,La)(CO_3)_2F$ 、阿武隈石 $(Ca,Y)_5[(PO_4)(SiO_4)]_3(OH,F)$ 、モナズ石 $(Ce,La,Nd)(PO_4)$ に含まれる。この中でもアームストロンガイトはハンボクト花崗岩体中のペグマタイトから始めて発見された鉱物で、アポロ 11 号で月面着陸をしたアームストロング船長の名前に由来する (Fleischer, 1974)。

ムシュガイ・ハダック鉱床はオルン・オブート鉱床とともに、ゴビアルタイ地塊とグルヴァンサイハン地塊を大別する構造境界の南側に位置する(第 2 図)。この鉱床は 1970 年代のロシア人による地質調査の際に発見され地表から 200m の深度まで探鉱された。約 25 万トンの酸化希土鉱が見込まれている。

この地域にはシルル系、デボン系、石炭系の石灰岩を含む堆積岩類が分布し (Wang et al., 2005)、三疊紀の花崗岩類の貫入を受けている。その後、白亜紀 (122Ma; 渡辺, 未公表資料) に閃長岩を含むアルカリ岩類 (ムシュガイ火山・深成岩類) が貫入・噴出する。カーボナタイトは主としてアルカリ深成岩類に伴われている(第 23 図)。



第 23 図 ムシュガイハダック地域の地質図。Tshehenpil and Baatarsuren (1992) を改変。

希土類元素を含む鉱体は、磁鉄鉱-燐灰石からなるカーボナタイトに主として含まれる。17 箇所で見出され、それぞれは急傾斜した幅数 m~30m、延長数 10m~200m のレンズ状の形態を呈する(第 24 図)。鉱体は、燐灰石、磁鉄鉱、方解石、螢石により

構成され、希土類元素は方解石、螢石、燐灰石、バストネサイトに含まれる。この鉱体はハンボクトと異なり軽希土類に富む。アルカリ岩の構成鉱物中のメルト包有物は、燐灰石、天青石 ($SrSO_4$)、方解石、アンケライト、硬石膏等の娘鉱物を含む。燐灰石や硫酸塩鉱物を含む燐灰石中のメルト包有物は最高 1200°C の均質化温度を示し、マグマの結晶分化作用の際に、希土類元素に富むメルトが形成されたと解釈されている (Andreeva et al., 2001)。



第 24 図 ムシュガイハダック地域の燐灰石カーボナタイト(第 23 図の A)の産状。小丘全体が燐灰石からなる。

4. おわりに

以上に紹介したように、モンゴル南部のゴビ地域には、そのダイナミックな地質構造発達史を反映して各種の鉱物資源が豊富に存在する。金属鉱床の発見の端緒は、ソ連を中心としたコメコン各国の協力のもとに行われた 10~20 万分の 1 地質図を作成するための組織的な地質・鉱床調査である。1990 年代初頭に JICA の調査により、それまでモンゴル地質情報センターで保管されていたロシア語の文献が英訳されたために、鉱物資源情報を欧米の鉱山会社の知るところとなり、同時に外国企業に開かれた鉱業法が施行されたことが現在の鉱物資源開発ブームを作った要因と言える。私が 1997 年にゴビ地域を訪れたとき、カナダのジュニア探鉱会社の地質技師がバイブルのように JICA の報告書を持っていたのを思い出す。

1994-1999 年に行われた JICA のプロジェクト型技術協力事業「モンゴル共和国地質鉱物資源研究所プロジェクト」では、モンゴル地質調査所に対して分析機器の供与が行われた(第 25 図)。その後、中央地質分析所(モンゴル地質調査所の分析部門)は、ISO17025 を取得し、世界中の分析機関から十分な分析技術・精度を持った分析機関としての認証を受け、モンゴル国内で鉱床探査をしている企業からの分析を受注し利益を上げるなど大きく変貌をとげている。



第 25 図 JICA プロジェクトの供与機材とモンゴル人化学分析技師。

現在モンゴルでは、欧米企業のみでなく、モンゴル民族系鉱山会社も大規模な探査事業を行っており、今後インフラが整備され、多くの鉱山が開発され、益々発展していくことが予想される。同時に「忍者」の問題の解決や乱開発を防止するための施策も望まれる。

謝辞：本報告を作成するに当たり、アイバンホーマイニングの Khashgerel さんからはオユトルゴイ鉱床で発見された恐竜の卵の写真を提供して頂いた。モンゴル科学技術大学の Minjin 教授には南ゴビ地域の古生界についてご教授頂き、Butemj さんには調査の手伝いをして頂いた。以上の方々に感謝の意を表します。

文献

- Amar-Amgalan, S., Iizumi, S., Gerel, O. and Garamjav, D. (2005): Khanbogd complex in south Mongolia: An example of A-type granite. *Mongolian Geoscientists* (in press).
- Andreeva, I.A., Kovalenko, V.I. and Naumov, V.B. (2001): Silicate, silicate-salt and salt magmas of the alkaline carbonatite-bearing complex Mushugai-Khudauk in southern Mongolia: Evidence of melt inclusions. XVI ECROFI European Current Research on Fluid Inclusions, Porto 2001 Abstracts. Faculdade de Ciências do Porto, Departamento de Geologia, Memória nº 7, p. 3-5.
- Badarch, G., Cunningham, W.D., and Windley, B.F. (2002): A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 21, 87-110.
- Bat-Erdene, K., Rye, R.O., Hedenquist, J.W., and Kavalieris, I. (2005): The high-grade Hugo Dummett porphyry Cu-Au deposit, south Gobi, Mongolia: Reconnaissance stable isotope study. Abstract of the GSA Meeting at Salt Lake City, 2005.
- Burenhun, F. et al. (1991): 1:200,000 Geological mapping in “Galba Govi” district, Umnugovi province, Mongolia. Open file report, K-48-XI, K-48-XII. Geological Information Center, Mongolia.
- Fleischer, M. (1974) New mineral names. *American Mineralogist*, v. 59, p. 208-212.
- Graham, S.A., Hendrix, M.S., Johnson, C.L., Badamgarav, D., Badarch, G., Amory, J., Porter, M., Barsbold, R., Webb, L.E., and Hacker, B.R. (2001): Sedimentary record and tectonic implications of Mesozoic rifting in southeast Mongolia. *GSA Bulletin*, v. 113, 1560-1579.
- Heinrich, C.A., Günther, D., Audétat, A., Ulrich, T., Frischknecht, R. (1999) Metal fractionation between magmaic brine and vapor, determined by microanalysis of fluid inclusions. *Geology*, 27, 755-758.
- Hendrix, M., Graham, S.A., Amoy, J.Y., and Badarch, G. (1996) Noyon Uul syncline, southern Mongolia: Lower Mesozoic sedimentary record of the tectonic amalgamation of central Asia. *GSA Bulletin*, v. 108, p. 1256-1274.
- 石原舜三(2006): フッ素に富む国, モンゴル: オンゴナイトを訪ねて. *地質ニュース*, no.610, 6-16.
- Japan International Cooperation Agency (1992): Report on the mineral exploration in the Uudam-tal area, Mongolian People’s Republic (phase 1), Tokyo, JICA, 124p.
- Jargalsaikan, D. (1998): Mongolia-Mineral Resources and Mining Opportunities. *Watkiss Studios, Biggleswade*, 128p.
- Khand, Y., Badamgarav, D., Ariunchimeg, Y., and Barsbold, R. (2000): Cretaceous systems in Mongolia and its depositional environments. *Cretaceous Environments of Asia*, eds., Okada, H., and Mateer, N.J., Elsevier Science B.V., 49-79.
- Kovalenko, V. I. and Yarmolyuk, V. V. (1995): Endogenous rare metal ore formations and rare metal metallogeny of Mongolia. *Economic Geology*, v. 90, p. 520-529.
- Kobalenko, V.I., Yarmolyuk, V.V., Kovach, V.P., Kotov, A.B., Kozakov, I.K., Salnikova, E.B., and Larin, A.M. (2004) Isotope provinces, mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian mobile belt: geological and isotopic evidence. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 23, 605-627.
- Lamb, M.A. and Badarch, G. (1997): Paleozoic sedimentary basins and volcanic-arc systems of southern Mongolia: New stratigraphic and sedimentologic constraints. *International*

- Geology Review, v. 39, p. 542-576.
- Lamb, M.A., and Cox, D. (1998): New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age data and implications for porphyry copper deposits of Mongolia. *Economic Geology*, v. 93, 524-529.
- Lamb, M.A., Hanson, A.D., Graham, S.A., Badarch, G., and Webb, L.E. (1999): Left-lateral sense offset of Upper Proterozoic to Paleozoic features across the Gobi Onon, Tost, and Zuunbayan faults in southern Mongolia and implications for other central Asian faults. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 173, 183-194.
- Meng, Q-R. (2003) What drove late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? *Tectonophysics*, v. 369, 155-174.
- Mining Journal (2005) *Mining Journal* 18 December, 2005.
- Minjin, C., Sersmaa, G., and Erdenechuluun C. (2004) The stratigraphy of Devonian and Carboniferous rocks in south Mongolian volcanic belt. Research Center for Stratigraphy and Paleontology, School of Geology, Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, 29p.
- Perelló, J., Cox, D., Garamjav, D., Sanjdorj, S., Diakov, S., Schissel, D., Munkhabat, T-O., and Oyun, G. (2001): Oyu Tolgoi, Mongolia: Siluro-Devonian porphyry Cu-Au-(Mo) and high-sulfidation Cu mineralization with a Cretaceous chalcocite blanket. *Economic Geology*, v. 96, 1407-1428.
- 坂巻幸雄(1999): モンゴル国の鉱物資源開発－現状と問題点－. *資源と素材*, vol. 115, 865-870.
- Schatz, O.J., Dolejš, D., Stix, J., Williams-Jones, A.E., and Layne, G.D. (2004): Partitioning of boron among melt, brine and vapor in the system haplogranite-H₂O-NaCl at 800°C and 100 MPa. *Chemical Geology*, 210, 135-147.
- 高橋裕平(2004): モンゴルにおける鉱業活動. *地質ニュース*, no.600, 18-24.
- Tshehenpil, D. and Baatarsuren, B. (1992): Sketch geological map of REE Mushugai hudag area scale 1:10,000. Report of the Gobi Geological Company, 19p.
- Wang, C., Weddige, K. and Chuluun, M. (2005): Age revision of some Paleozoic strata of Mongolia based on conodonts. *Journal of Asian Earth Science*, v. 25, p. 759-771.
- Wang, T., Zheng, Y., Li, T., and Gao, Y. (2004) Mesozoic granitic magmatism in extensional tectonics near the Mongolian border in China and its implications for crustal growth. *Journal of Asian Earth Sciences* v. 23, 715-729.
- Watanabe, Y., and Stein, H. (2000): Re-Os ages for the Erdenet and Tsagaan Suvarga porphyry Cu-Mo deposits, Mongolia, and tectonic implications. *Economic Geology*, v. 95, 1537-1542.
- Zheng, Y., Zhang, Q., Wang, Y., Liu, R., Wang, S.G., Zuo, G., Wang, S.Z., Lkaasuren, B., Badarch, G., and Badamgarav, Z. (1996): Great Jurassic thrust sheets in Beishan (North Mountains)-Gobi areas of China and southern Mongolia. *Journal of Structural Geology*, v. 18, 1111-1126.