

氏名	Chinbat Khishgee		
学位の種類	博士 (理学)		
学位記番号	総博甲第 1 0 1 号		
学位授与年月日	平成 2 7 年 9 月 2 4 日		
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項		
文部科学省報告番号	甲第 5 4 4 号		
専攻名	マテリアル創成工学専攻		
学位論文題目	Orogenic type gold mineralization in the North Khentei gold belt, Central Northern Mongolia (北モンゴル中央部北ケンテイ金鉱床帯における 造山帯型金鉱化作用)		
論文審査委員	主査	島根大学教授	赤坂 正秀
		島根大学教授	高須 晃
		島根大学教授	三瓶 良和
		島根大学准教授	亀井 淳志
		秋田大学教授	渡辺 寧

## 論文内容の要旨

The representative gold and copper deposits in the North Khentei gold belt of Mongolia were investigated to characterize their mineralization and genetic evolution, based on the ore occurrence, mineralogy, hydrothermal alteration, fluid inclusion and age dating studies.

The gold mineralization in representative Boroo, Gatsuurt and Ulaanbulag deposits occurs as two and three ore types: I) disseminated and stockwork ores in granitoid, volcanic and metasedimentary rocks; II) auriferous quartz vein ores, quartz vein ores and siliceous ores in the Boroo, Gatsuurt and Ulaanbulag deposits, respectively; and III) silicified zone ores only in the Gatsuurt deposit. Ore grades of each type are about 1 to 3, 5 to 10 and more than 10 g/t Au grades, respectively.

The main sulfide minerals in the ores of gold deposits are pyrite and arsenopyrite, both of which are divisible into two different stages (pyrite-I and pyrite-II; arsenopyrite-I and arsenopyrite-II). Sphalerite, galena, chalcopyrite, and tetrahedrite are minor associated minerals, with trace amounts of bournonite, boulangerite, geerite, alloclasite, native gold, and electrum. The ore minerals in the both types of ores are variable in distribution, abundance and grain size. Four modes of gold occurrences are recognized in these three deposits: 1) invisible gold in pyrite and arsenopyrite in the disseminated and stockwork ores and the auriferous quartz vein ores; 2) microscopic native gold 3 to 100  $\mu\text{m}$  in diameter that occurs as a filling phase or interstitial phases in sulfides in the both ores types; 3) visible native gold, up to 1 cm in diameter, in the disseminated and stockwork ores of the Boroo and Gatsuurt deposits; and 4) electrum in the auriferous quartz vein ores of the Boroo deposit.

The Khadat copper deposit occurs as the vein type mineralization in the intrusive stocks or dikes and metasedimentary rocks. The main copper bearing ore mineral is chalcopyrite, and minor amounts of pyrite, arsenopyrite, pyrrhotite, sphalerite and galena are recognized. However, assemblages of minor minerals are varied depend on depth of the deposit.

The disseminated and stockwork mineralization in the Boroo, Gatsuurt and Ulaanbulag deposits is composed of four distinct stages: (i) pyrite-I + arsenopyrite-I, (ii) pyrite-II + arsenopyrite-II, (iii) sphalerite + galena + chalcopyrite + tetrahedrite + bournonite + boulangerite + jamesonite + scheelite + alloclasite + native gold and (iv) native gold. In auriferous quartz vein mineralization, five, four and four crystallization stages are also recognized in these deposits, respectively: (i) pyrite-I + arsenopyrite, (ii) pyrite-II + arsenopyrite + galena + tetrahedrite-tennantite, + sphalerite + chalcopyrite + bournonite, (iii) sphalerite + galena + chalcopyrite + geocronite + geerite + native gold, (iv) tetrahedrite-tennantite + bournonite + geerite + native gold, and (v) electrum. Both ore types are associated with sericitic and siliceous alterations. The As-Au relations in pyrite-II and arsenopyrite in the gold deposits suggest gold detected as invisible gold is mostly attributed to  $Au^{+1}$  in those minerals.

In the copper deposit, five crystallization stages are recognized: (i) pyrite-I, (ii) pyrite-II, (iii) pyrite-III + arsenopyrite, (iv) pyrrhotite + sphalerite + galena + chalcopyrite, and (v) chalcopyrite.

At Boroo and Gatsuurt both ore types contain coexisting  $CO_2$ -rich and aqueous fluid inclusions. The inclusions in quartz of the disseminated and stockwork ores homogenized between 254–362°C, whereas inclusions in the auriferous quartz vein ores of the Boroo homogenized between 237–305°C. Fluid salinities in both ore types range from 3–6 wt% (NaCl equiv.).

The U-Pb age of zircons from Boroo host granites of  $472.5 \pm 6.9$  Ma is much older than previously defined alteration minerals ages (ca. 210 Ma). U-Pb age of zircons in host granodiorite of the Khadat deposit presents  $274.2 \pm 1.7$  Ma.

By applying arsenopyrite geothermometer to arsenopyrite-II in the type-II ores of gold deposits and arsenopyrite in copper deposit, crystallization temperature and  $\log f_{S_2}$  are estimated to be 300-365°C and -7.5 to -10.1, and 400-495°C and -5 to -6.8, respectively.

The results indicate that these gold deposits were developed in two stages. The disseminated and stockwork ores are early stage, formed by hydrothermal metasomatic alteration, and auriferous quartz vein ores are later stage, deposited due to cooling temperature of the hydrothermal fluids. According to the paragenetic sequences in the Boroo, Gatsuurt and Ulaanbulag deposits, gold mineralization can be formed from the same source of the hydrothermal activity in this region. Thus, the gold deposits can be classified as contiguous orogenic type mineralization. The Khadat copper deposit could

be expected to be one of the porphyry systems in this orogenic gold belt, due to geologic setting, mineral assemblages and high crystallization temperatures.

# 論文審査結果の要旨

博士論文は、モンゴルで最も多く金を生産してきた北ケンテイ金鉱化帯における金鉱床の地質学的、鉱床学的、鉱物学的、年代学的研究による、119 ページの英語論文である。本論文は、金鉱床の地質調査、鉱石の記載・分類、鏡下観察、鉱石鉱物の化学組成分析、流体包有物分析、母岩変質分析、年代測定を行った結果、および、それに基づく各鉱床における鉱石鉱物の生成プロセス、鉱液の性質、鉱床生成条件、鉱床生成年代、鉱床生成場と鉱床タイプ、本金鉱化帯における金鉱床探査への寄与、に関する考察、から構成される、

モンゴルの北ケンテイ金鉱化帯は重要な金産出地域であるが、金の産状、鉱石鉱物の晶出過程と金鉱物の晶出時期、金鉱床の生成条件と成因に関して十分解明されてこなかった。また、本鉱化帯の鉱床タイプについて異なる結果が報告され、鉱床の実態も未解決のことが多かった。申請者は、モンゴルにおける金鉱化作用の地球科学的解明と、今後の金探査・生産に対する寄与を目的として、本鉱化帯で代表的な Gatsuurt, Boroo, Ulaanbulag の3金鉱床、および、Khadat 銅鉱床に関する鉱床の金鉱化作用の研究を行い、その解明に成功した。

本論文では、金を産出する鉱石は(1) 鉱染・鉱脈型鉱石、(2) 含金石英脈型鉱石、(3) 珪化帯型鉱石、であり、それぞれの金含有量が 1-3 g/ton, 5-10 g/ton, 10 g/ton 以上であることが示された。金の産状は、(1) 黄鉄鉱および硫砒鉄鉱の結晶構造中の「不可視金 (invisible gold)」、(2) 硫化鉱物粒間を充填する 3-100  $\mu\text{m}$  の大きさの自然金、(3) 鉱染・鉱脈型鉱石で特徴的な 1 cm 以上の大きさの自然金、(4) 含金石英脈方鉱石に特徴的なエレクトラム (金銀合金)、の4通りであることを明らかにした。各鉱石では4ないし5期の鉱化時期が認定され、金の晶出は最後の時期のものと決定された。金鉱床においては、流体包有物の充填温度から、鉱染・鉱脈型鉱石の生成温度が 362~254°C、含金石英脈型鉱石の生成温度が 305~237°Cと決定されるが、黄鉄鉱と硫砒鉄鉱の砒素含有量と鉱物組み合わせから得られた生成温度が 365~300°Cであり、調和的である。また、 $\log f_{\text{S}_2}$  が-7.5~-10.1 と求められた。他方、銅鉱床の生成条件は 495~400°C、 $\log f_{\text{S}_2}$  が-5.0~-6.8 と求められた。各鉱床における鉱石鉱物の共生関係、晶出時期、生成環境の検討から、鉱染・鉱脈型鉱石が鉱化作用の最も初期の時期に生成し、鉱液である熱水流体の温度下降に伴い、含金石英脈型および珪化帯型鉱石が生成したと結論された。また、これらの鉱床の金鉱化作用は同一のマグマからもたらされた熱水流体によるものであること、および、造山帯型金鉱床であることを解明した。

博士論文は、モンゴルにおける金鉱床の実態を地球科学的に解明した初めてのものであり、それらの生成環境と成因を解明したことは、モンゴルにおける今後の金資源探査に対して重要な貢献をなすものである。また、本研究により本鉱床群の金が自然金としてだけでなく、黄鉄鉱・硫砒鉄鉱の構造中にも存在していることが示されたことは、今後、本鉱化帯における鉱石からの金の生産量を上げる上で大きな手掛かりとなり、歓迎される成果である。更に、これまで金鉱床はそれを胚胎する花崗岩類のマグマがもたらした熱水によって生成したと考えられてきたが、本研究によって花崗岩類の生成年代が鉱床生成年代よりはるかに古いものであることがわかり、金鉱床の成因を再検討する必要があることを明らかにした。

以上のように、本博士論文では、(1) 研究背景に基づく研究目的設定、研究方法が適切であ

り、(2) 研究内容は徹底した調査と観察、および先端的研究手法に基づいた分析・解析が行われており、(3) 調査・観察・分析結果から重要な結論を得るための優れた考察が成されており、(4) 独創的で応用性も高い重要な成果が得られている。したがって、本博士論文は極めて優れたものと評価され、「合格」と判定された。