

学 位 論 文 題 名

Porphyry Copper-Gold Deposits of Western Pacific  
: Genesis, Evolution of Hydrothermal System, and  
Island Arc Metallogeny

（西太平洋地域の斑岩銅金鉱床：成因、熱水  
系のエボリューション、島弧メタロジェニー）

学位論文内容の要旨

斑岩銅鉱床は、火山体下の地下浅所に貫入した含水の中性～珪長質マグマから放出された鉱化流体によって生成される熱水成鉱床である。本研究では、斑岩銅鉱床における以下の問題について、西太平洋地域に分布する諸鉱床を例に明らかにした。すなわち、1) 斑岩銅鉱床をもたらす貫入岩の岩石学的特性、2) マグマが貫入し固結した直後に発達する最も初期の熱水系、3) 冷却に伴い発達する浅熱水系へ至るまでの熱水系の進化、そして4) 斑岩銅鉱床を生成する島弧の特性、以上を解明するため、マレーシア、サバ州のキナバル山貫入複合岩体に伴われるマムート鉱床と、フィリピン西ルゾン弧の、サントトーマスII、レパントファーサウスイースト（FSE）、デイゾン鉱床をはじめとする諸鉱床およびピナツボ火山の1991年噴火の際の噴出物を対象として、本研究は遂行された。

斑岩銅鉱床をもたらすマグマ／貫入岩は次のような重要な特徴を示す：1) マグマは貫入時には水を主成分とする流体相に飽和、分相していた、そして2) 極めて高い酸化状態におかれていた。そしてこのような状態下ではマグマ中、およびマグマから分相した水を主成分とする流体相中に、硫黄は酸化種として溶存している。含水マグマからの水を主成分とする流体相の分相は、1) 減圧、すなわちマグマの地殻浅所への上昇、貫入によって飽和する場合と、2) マグマの固結、結晶化の進行に伴って飽和する場合があるが、西太平洋地域の斑岩銅金鉱床の生成に関与した鉱化流体の発生においては前者が重要であり、貫入したマグマ柱中を上昇する流体相によって鉱床構成元素が移動、濃集する。火山体下という地殻浅所での高温の水を主成分とする流体相は、濃厚塩水と希薄気相の不混和な2相流体であるが、このために生じる濃厚塩水が斑岩銅鉱床の鉱化流体として決定的に重要である。これは、銅などの親銅元素、ナトリウムやカリウムといったアルカリ元素は水を主とする流体相には、塩素のモル濃度に比例してマグマから流体相に分配されるからである。このような、濃厚塩水を含む、水を主成分とする流体相の存在、高い酸化度をはじめとした、マグマと、マグマから分相した流体相との相互作用の結果は、さまざまな岩石学的、鉱物化学的な特徴により解析が可能である。すなわち、斑岩銅鉱床を伴う貫入岩では、鉱化作用を伴わないものに比べて、1) 角閃石や黒雲母などの含水マフィック珪酸塩鉱物が高い $X_{Mg}$ を持つ（高い酸素分圧を示す）、2) 斑岩の斑晶角閃石には半樹枝状のトレモラ閃石の縁が発達する（トレモラ閃石に対し角閃石圧力計を応用して見積もられるような低圧のもとでのCa角閃石の出現のためには固結時に水に飽和していることを示す）、3)

斑晶角閃石の中心部と縁のトレモラ閃石との間には、シリカ、アルミニウム含有量において組成ギャップが見られる（角閃石圧力計を応用して急激な圧力低下を示す）、4）黒雲母、燐灰石などの含水鉱物では水の席を塩素および沸素が置換している（濃厚塩水の存在を示す）、5）燐灰石では硫黄をある程度含有するものが存在（マグマ中に硫黄が酸化種として溶存していることを示す）、そして6）変質作用を蒙っていない場合でも石基のアルカリ元素の含有量が高くなっている（マグマ柱中を上昇する流体相によるアルカリ元素の移動、濃集を示す）。これに対し、鉱化作用を伴わない岩体では7）輝石が斑晶ないし微斑晶として存在する（低い水の分圧を示す）、8）特に鉱化作用後の貫入岩体では顕著に石基がアルカリ元素に枯渇してアルミナスになっている（流体相によりアルカリ元素が抽出された残存マグマと解釈される）。

貫入したマグマが冷却、固結し、サブソリダスの環境下に入ると、濃厚塩水である熱水溶液と固結した貫入岩体（および周辺の岩石）との間での相互作用により、熱水変質作用と鉱石鉱物の沈殿が引き続いて起こる。斑岩銅鉱床においては熱水成黒雲母の生成で特徴づけられるカリウム質変質が、最も重要な、初期の変質作用であるが、これは、温度低下に伴い、岩石と熱水溶液との間でのアルカリ元素（ナトリウムとカリウム）の分配比の変化によって、カリウムが岩石に付加され、ナトリウムが熱水溶液に分配されることによって生じると考えられる。この貫入岩体固結直後の初期の熱水系において沈殿した銅-鉄硫化物を主とする鉱石鉱物の組合せには、現在観察される黄銅鉱ではなくて、初生的には中間固溶体（iss）が含まれていたと考えられるが、これらの銅-鉄硫化物の沈殿が、マグマおよび分相した流体相に酸化種として存在した硫黄の一部が還元種に転換することにより促進されることに起因する。これは、流体相中に主として $\text{SO}_2$ として存在していた硫黄が水と自己酸化還元反応することによって、濃厚塩水からなる熱水中に硫酸根と硫化水素を生じるためであると考えられる。熱水溶液中の鉄の大部分が熱水中の硫化水素を生じる以前に酸化物として沈殿した場合には、銅-鉄硫化物鉱物組合せは現在は主に黄銅鉱+斑銅鉱（初生的にはiss+斑銅鉱固溶体）からなるのに対し、熱水溶液中の鉄が熱水中の硫化水素を生じる以前に酸化物として沈殿しない場合には、銅-鉄硫化物鉱物組合せは現在は主に黄銅鉱+磁硫鉄鉱±キューバ鉱（初生的にはiss±磁硫鉄鉱）からなる。

斑岩銅鉱床には、しばしば浅熱水系の鉱化作用が重複するが、これは多くの場合、硫酸酸性/高硫化型の鉱物組合せ、すなわち黄鉄鉱±硫ヒ銅鉱±輝安鉱などからなり、これを取り囲んで、またはブランケット状に覆う累進粘土化（アドヴァンストアージリック）変質帯をともなっている。硫化鉱物（および随伴する硫酸塩鉱物）の硫黄同位体比のシステムティックスは、高温で生成した斑岩銅鉱床から重複する浅熱水系鉱化作用まで、一連の熱水系の温度低下によるエボリューションで生じたことを示す。このような重複がみられる斑岩銅鉱床では、しばしばダイアトリーム、角れきパイプ、そして斑岩銅鉱床全体または一部を横断するように裂か群が発達して、初期に形成された斑岩銅鉱床が大きく破壊されていることがある。このような重複している浅熱水系の鉱化流体は、流体包有物の観察結果によると、気相包有物が非常に卓越することが多く、圧力-温度勾配に対して、ガス圧が過剰になっていると推定される。これは、斑岩銅鉱床形成時の熱水系の熱構造が、ダイアトリーム、角れきパイプ、裂か群の発達により破壊されることにより、初期の岩圧下に近い温度-圧力から、静水圧下の浅熱水系へ移行していく過程と考えられる。

西ルゾン弧の斑岩銅鉱床は、マニラ海溝における東向きの沈み込みに由来する含水火成活動に伴われて生成している。生成の年代はロボ／ボネン鉱床（ $10.5 \pm 0.4\text{Ma}$ ）、サントニーニョ（ $9.5 \pm 0.3\text{Ma}$ ）、タイサン（ $7.3 \pm 0.2\text{Ma}$ ）、デイゾン（ $2.5 \pm 0.2\text{Ma}$ ）、ブラックマウンテン（ $2.1 \pm 0.1\text{Ma}$ ）、サントトーマスII（ $1.5 \pm 0.4\text{Ma}$ ）と求められた。1991年6月に噴火したピナツボ火山からの噴出物のデイサイトは、上述のような斑岩銅鉱床を形成した貫入岩が持つ特徴を有しており、斑岩銅鉱床生成のポテンシャルを持った現世の火成活動

の例であると推察される。これらの斑岩銅鉱床は約10Maから現在に至るまで西ルゾン弧において生成されている、と考えられるが、これら斑岩銅鉱床の列は約10Maから現世まで、海溝に対して移動しておらず、火成活動の列で基盤が上昇している。これは斑岩銅鉱床をもたない島弧で浅熱水鉱床、火成活動が時代とともに海溝側へ移動していくこと、火成活動列において基盤が沈降しているのとは対照的である。斑岩銅鉱床生成のメタロジェニーとしては、オブリーク沈み込み、島弧にほぼ並行な横ずれ断層の発達、火成活動列での基盤の上昇、が挙げられ、地殻浅所に高度に酸化した含水マグマが貫入、定置することが本質的に重要であると結論される。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 石 原 舜 三

副 査 教 授 宇 井 忠 英

副 査 助 教 授 松 枝 大 治

## 学 位 論 文 題 名

### Porphyry Copper – Gold Deposits of Western Pacific : Genesis, Evolution of Hydrothermal System, and Island Arc Metallogeny

(西太平洋地域の斑岩銅金鉱床：成因、熱水

系のエボリューション、島弧メタロジェニー)

斑岩銅鉱床は Cu, Au, Mo の重要な供給源であり、火山体下の地下浅所に貫入した含水の中性～珪長質マグマから放出された鉱化流体によって生成される熱水性鉱床である。著者は、斑岩銅鉱床における以下の問題について、西太平洋地域に分布する諸鉱床を例に明らかにした。すなわち、1) 斑岩銅鉱床をもたらす貫入岩の岩石学的特性、2) マグマが貫入し固結した直後に発達する最も初期の熱水系、3) 冷却に伴い発達する浅熱水系へ至るまでの熱水系の進化、そして4) 斑岩銅鉱床を生成する島弧の特性。

斑岩銅鉱床をもたらすマグマ／貫入岩は次のような重要な特徴を示す：1) マグマは貫入時には水を主成分とする流体相に飽和、分相していた。そして2) 極めて高い酸化状態におかれていた。このような状態下ではマグマ中、およびマグマから分相した水を主成分とする流体相中に、硫黄は酸化種として溶存している。含水マグマからの水を主成分とする流体相の分相は、1) 減圧、すなわちマグマの地殻浅所への上昇、貫入によって飽和する場合と、2) マグマの固結、結晶化の進行に伴って飽和する場合があるが、西太平洋地域の斑岩銅金鉱床の生成に関与した鉱化流体の発生においては前者が重要であり、貫入したマグマ柱中を上昇する流体相によって鉱床構成元素が移動、濃集する。火山体下という地殻浅所での高温の水を主成分とする流体相は、濃厚塩水と希薄気相の不混和な2相流体であるが、このために生じる濃厚塩水が斑岩銅鉱床の鉱化流体として決定的に重要である。これは、銅などの親銅元素、Na や K といったアルカリ元素は水を主とする流体相には、塩素のモル濃度に比例してマグマから流体相に分配されるからである。

斑岩銅鉱床を伴う貫入岩は、鉱化作用を伴わないものに比べて、1) 角閃石や黒雲母などの含水マフィック珪酸塩鉱物が高い  $X_{Mg}$  を持つ (高い酸素分圧を示す)、2) 斑岩の斑晶角閃石には半樹枝状のトレモラ閃石の縁が発達する (固結時に水に飽和)、3) 斑晶角閃石の中心部と縁のトレモラ閃石との間には、Si、Al 含有量において組成ギャップが見られる (急激な圧力

低下)、4) 黒雲母、燐灰石などの含水鉱物では水の席を塩素および沸素が置換している(濃厚塩水の存在)、5) 燐灰石は硫黄をある程度含有する(マグマ中の硫黄が酸化種)、6) 変質作用を蒙っていない場合でも石基のアルカリ元素の含有量が高い(流体相によるアルカリ元素の移動、濃集)。これに対し、鉱化作用を伴わない岩体では7) 輝石が斑晶ないし微斑晶として存在する(低い水の分圧)、8) 鉱化作用後の貫入岩体では、特に顕著に石基がアルカリ元素に枯渇してアルミナスになっている(流体相によりアルカリ元素が抽出された残存マグマ)。

後マグマ期に入ると、濃厚塩水と岩石との反応により熱水変質作用と鉱石鉱物の沈殿が起こる。カリウム質変質が、最も重要な初期の変質作用であるが、これは、温度低下に伴い、岩石と熱水溶液との間でのアルカリ元素の分配比の変化によって、Kが岩石に付加され、Naが熱水溶液に分配されて生じる。この時期の銅-鉄硫化物は、中間固溶体(iss)を含む銅-鉄硫化物であるが、その沈殿はマグマおよび分相した流体相に酸化種として存在した硫黄の一部が還元種に転換することにより促進される。これは、流体相中に主としてSO<sub>2</sub>として存在していた硫黄が水と自己酸化還元反応することによって、濃厚塩水からなる熱水中に硫酸根と硫化水素を生じるためである。熱水溶液中の鉄の大部分が熱水中の硫化水素を生じる以前に酸化物として沈殿した場合には、銅-鉄硫化物鉱物組合せは現在には主に黄銅鉱+斑銅鉱(初生的にはiss+斑銅鉱固溶体)からなるのに対し、熱水溶液中の鉄が熱水中の硫化水素を生じる以前に酸化物として沈殿しない場合には、銅-鉄硫化物鉱物組合せは現在には主に黄銅鉱+磁硫鉄鉱±キューバ鉱(初生的にはiss±磁硫鉄鉱)からなる。

上記の初期斑岩銅鉱床には、浅熱水系の鉱化作用が重複するが、これは多くの場合、硫酸酸性/高硫化型の鉱物組合せ、すなわち黄鉄鉱±硫び銅鉱±輝安鉱などからなり、これを取り囲んで、またはブランケット状に覆う累進粘土化(advanced argillic)変質帯をともなう。また、ダイアトリーム、角れきパイプ、そして斑岩銅鉱床全体または一部を横断するように裂か群が発達して、初期に形成された斑岩銅鉱床が大きく破壊されている。この重複している浅熱水系の鉱化流体は、流体包有物の観察結果によると、気相包有物が非常に卓越することが多く、圧力-温度勾配に対して、ガス圧が過剰になっている。これは、斑岩銅鉱床形成時の熱水系の熱構造が、ダイアトリーム、角れきパイプ、裂か群の発達により破壊されることにより、初期の岩圧下に近い温度-圧力から、静水圧下の浅熱水系へ移行していく過程と考えられる。

西ルゾン弧の斑岩銅鉱床は、マニラ海溝における東向き沈み込みに由来する含水火成活動に伴われて生成している。生成の年代を6鉱床で求めた(10.5~1.5Ma)。1991年6月に噴火したピナツボ火山からの噴出物のデイサイトは、上述のような斑岩銅鉱床を形成した貫入岩が持つ特徴を有しており、斑岩銅鉱床生成のポテンシャルを持った現世の火成活動の例であると推察される。斑岩銅鉱床生成のメタロジェニーとしては、オブリーク沈み込み、島弧にはほぼ並行な横ずれ断層の発達、火成活動列での基盤の上昇、が挙げられ、地殻浅所に高度に酸化した含水マグマが貫入、定置することが本質的に重要であると結論される。

本論文は、著者が卒業研究(マムート鉱床)以来12余年の長きにわたり実施した西太平洋地域の斑岩型鉱床の研究を集大成したものである。特に造岩鉱物、造鉱物の解析から、その生成過程を克明に書き、かつ広域的な視点からもその生成場を考察した。よって著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。