

生きている九州 - 浅熱水性金鉱床生成区の変遷

Evolving epithermal gold metallogenic provinces in Kyushu

渡辺 寧

WATANABE Yasushi, Institute for Geo-Resources and Environment, AIST
AIST Central 7, Higashi 1-1-1-1, Tsukuba, 305-8567, Japan
e-mail: y-watanabe@aist.go.jp

キーワード：九州，浅熱水性金鉱床，鉱床区，テクトニクス，地溝，新生代後期，地殻変動，豊肥，島原，鹿児島

1. はじめに

熱水鉱床は，広域テクトニクスに対応した火成活動や構造運動と密接に関係して，ある特定の時期に特定の場所に集中して形成される．このような特定の鉱床生成期の，特定の成因型の鉱床が密集する地域を「鉱床生成区」と呼ぶ．一つの鉱床生成区の中をさらに詳しく見てみると，火成活動や構造運動の様式や場所の変化に伴い，鉱床の形成場が時間の経過とともに移動したり，鉱床型が変化したりすることがある．

九州には，(1)北九州花崗岩関連鉱床区，(2)九州外帯花崗岩関連鉱床区，(3)北九州浅熱水性金鉱床区，(4)南九州浅熱水性金鉱床区と呼ばれる 4 つの金鉱床区が存在する(須藤ほか，2003)．このうち(1)と(2)の鉱床区の鉱床には卑金属鉱物に伴って金は副産物としてわずかに含まれるにすぎない．

(3)と(4)の鉱床区には，鮮新世から更新世にかけての火山活動に伴う浅熱水性金・銀鉱床が分布する(第 1 図)．これらの鉱床区には，菱刈鉱床を始め，串木野，鯛生鉱床等，日本を代表する金銀鉱床が含まれており(第 1 表)，九州を日本で最も重要な金の生産地にしている．ここでは特に(3)と(4)の鉱床区での鉱化作用の変遷を示し，変遷をもたらした原因を考察する．

第 1 表 日本の十大金銀鉱床

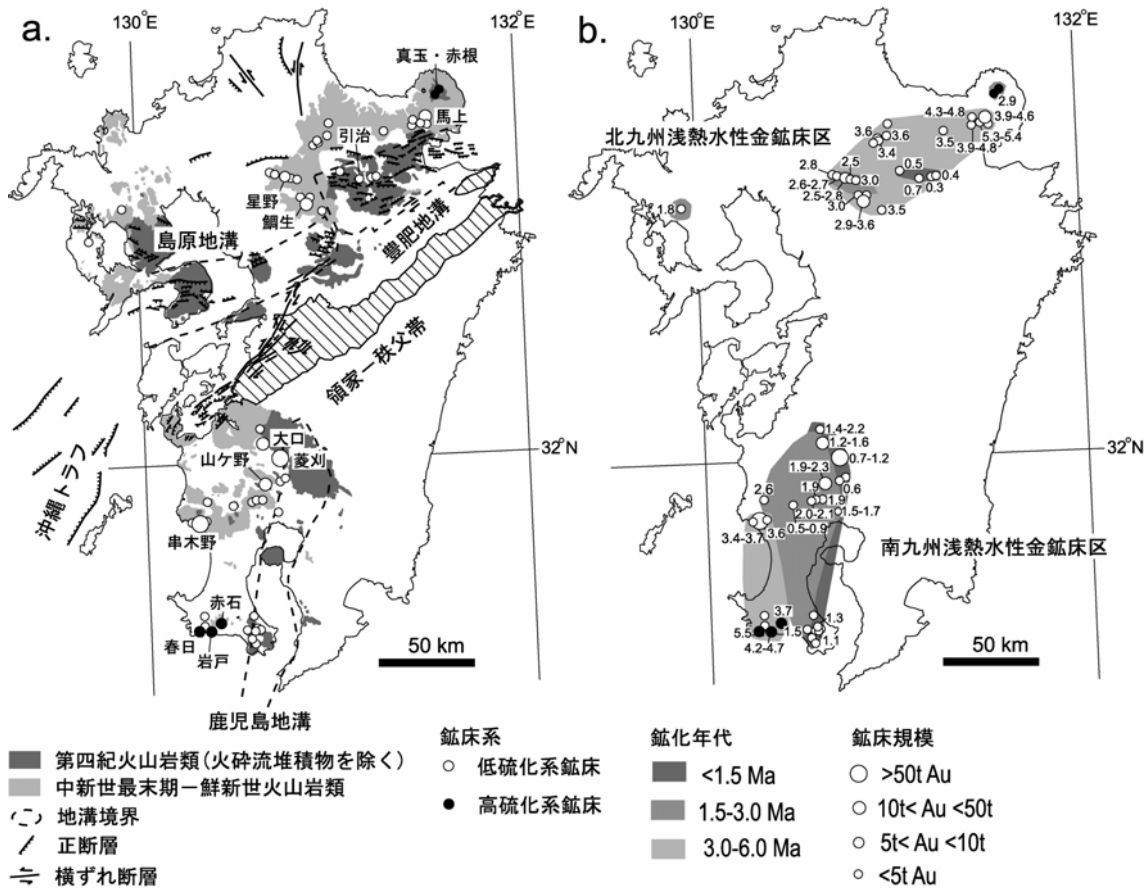
鉱床名	金生産+埋蔵量(t)	銀生産+埋蔵量(t)
1 菱刈	260	208
2 佐渡	73	2278
3 鴻の舞	73	1217
4 串木野	56	477
5 鯛生	36	137
6 高玉	29	280
7 山ヶ野	28	28
8 千歳	23	105
9 大口	22	17
10 清越	16	511

金属生産量に関する個々の文献は Garwin et al. (in press)を参照のこと．

2. 新生代後期の火成活動と構造運動の変遷

九州における新生代後期の火山岩類の分布は，九州中部を横断する中 - 古生代の付加帯からなる領家・秩父帯を境にして南北の 2 地域に分割される(第 1 図 a) 北部の火山岩類は，西南日本弧の最西端部に相当し，中 - 古生層からなる三郡帯や白亜紀の花崗岩類，挟炭層からなる古第三系を覆う．南部は琉球弧の北端部を構成し，火山岩類は白亜紀 - 古第三紀の

堆積岩類を覆って分布する．北部・南部の火山岩類の分布範囲は，ほぼ北九州浅熱水性金鉱床区,南九州浅熱水性金鉱床区に相当する(第1図 a)．それぞれの鉱床区での構造運動・火成活動と金鉱化作用の特徴を第2表に示す．



第1図 九州の金鉱床区，金鉱床，新生代後期火山岩類の分布(a)と年代(b)．主な地溝と断層の分布は，それぞれ Izawa and Watanabe (2001)と Kamata (1998)による．浅熱水性金鉱床のタイプ区分は木下編(1961)およびその後公表された論文の鉱石鉱物記載に基づいた著者の判断．金鉱床の年代の文献は須藤ほか(2003)を参照のこと．

2.1 九州北部

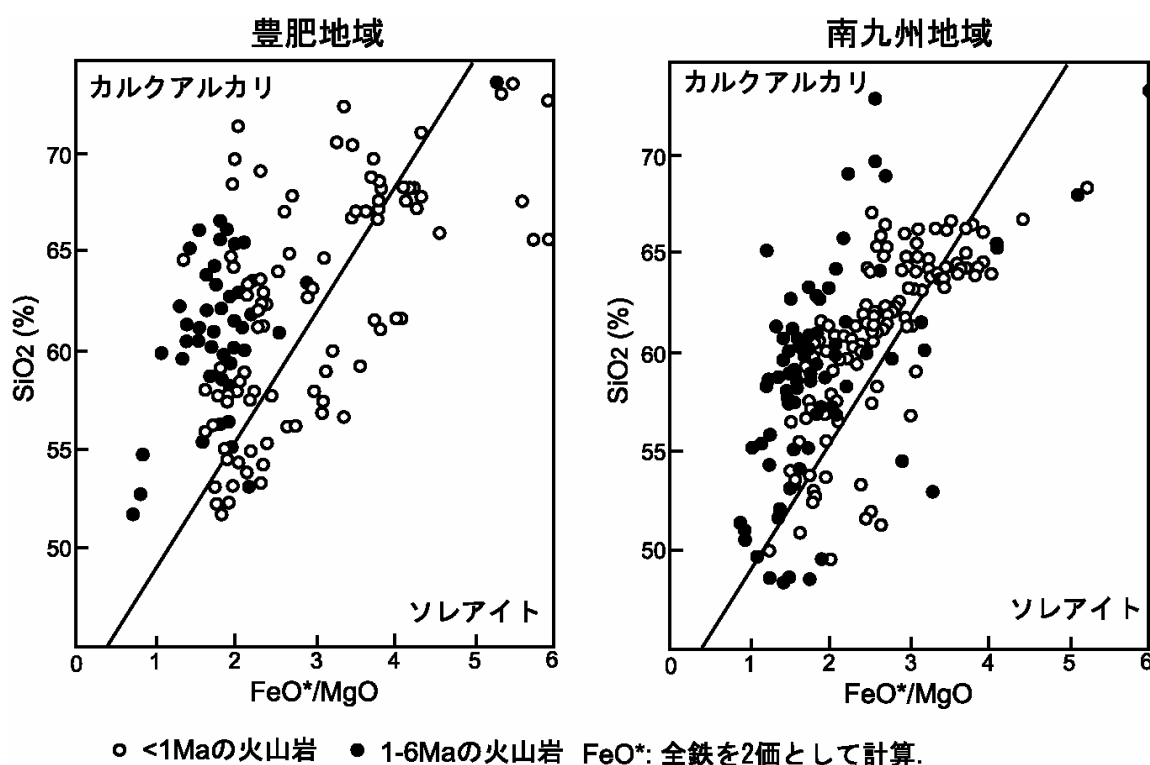
九州北部の火山岩類は，フィリピン海プレートの沈み込みによる西南日本弧の火山活動と琉球背弧の沖縄トラフでのリフティングに伴う火山活動が重複する地域(別府 - 島原構造帯とその北西側の地域)に分布する．さらに火山活動は構造発達史，火山活動史，岩石化学的性質の違いから東の豊肥火山地域と西の島原地域に区分される(第1図 a; 鎌田, 2003)．

豊肥火山地域では，火山活動は鮮新世初期に始まり，4-5Ma にそのピークを迎え，その後は単調に噴出面積・噴出量を減らし，現在では九重火山地域に活動が収束している．火山岩は主として松山 - 伊万里構造線，小倉 - 田川断層の南方延長部，大分 - 熊本構造線の3本の構造線の内側の東西約 70km, 南北約 40km の地溝の内部または周辺部に分布する(鎌田, 2003)．豊肥火山地域の地溝の形成は，大分 - 熊本構造線沿いの右横ずれ断層運動が大きく寄与しており(鎌田, 2003)，その形成史は，1) 1.5Ma 以前の南北引張応力による片地溝(half graben)および東西方向の正断層群の形成，2) 1.5Ma 以降の東西圧縮応力によるプルアパート堆積盆の形成に大別される．0.7Ma 以降には，火成活動域の収束とともに構造運動の活発な地域も縮小したとされる(Kusumoto et al., 1999)．

豊肥地域での火山活動は，鮮新世と更新世でその様式が異なる．鮮新世には安山岩マグマの東西方向の割れ目噴火が卓越し，デイサイト，流紋岩溶岩と少量の玄武岩が伴われる

(Kamata, 1989) 更新世(<150 万年)には、割れ目噴火により生じる溶岩台地が小規模になり、0.7Ma 以降には中心噴火の卓越する阿蘇、九重、由布鶴見などの成層火山体が、鮮新世の東西方向の構造に斜交する北東 - 南西方向の火山フロントに沿って配列する(第 1 図 a; Kamata, 1998) .この火山フロントの背弧には 1 ~ 0.3Ma の黒雲母流紋岩が限られた地域に分布する(Kamata, 1998) .

鮮新世以降の豊肥火山岩類はカルクアルカリまたは高アルカリソレイト系列の化学組成を持ち、時代とともに K_2O の含有量が増え、またソレイト系列の岩石の割合が増加する(第 2 図; Nakada and Kamata, 1991) . 中新世末期から鮮新世の豊肥火山岩類にはNbに富んだ安山岩が含まれ、これらはフィリピン海プレートとの沈みこみと直接関係を持たない深部から上昇してきたアセノスフェアに由来するメルト(プレート内アルカリ玄武岩 ~ ソレイト)と島弧マントルとの反応により形成されたと考えられている(永尾ほか, 2000; 沢井ほか, 2002) . 同様の組成の岩石は第四紀の火山フロント沿いの火山岩類からも見出されており、第四紀にはプレート内型と島弧型の両方の性質のマグマが同時期に噴出したことが確かめられている(Kita et al., 2001) .



第 2 図 豊肥地域(Nakata and Kamata, 1991)および南九州地域(永尾ほか, 1983)の火山岩類の化学組成 .

島原地区から北西九州地域では約 10Ma 以降、数回の玄武岩・安山岩・デイサイトの火山活動期が認められる(Nakada and Kamata, 1991; 横瀬ほか, 1999) .鮮新世以降の北西九州地域の玄武岩マグマは、アルカリまたは高アルカリソレイト質の典型的な海洋島玄武岩の組成を持つ(Nakata and Kamata, 1991; Hoang and Uto, 2003) .中新世末に始まり 2Ma 以降急速に形成された沖縄トラフ(古川, 1991)の最北端部である島原地溝帯(第 1 図 a; 多田, 1985)では、カルクアルカリ安山岩類と海洋島玄武岩類が共存し、ここでもプレート内型と島弧型の両方のマグマの活動が認められる(横瀬ほか, 1999; Kita et al., 2001) . この地溝帯は現在、南北方向の伸張場であり、豊肥火山地域とは逆に約 2Ma 以降火山岩の噴出量が増大しているが、火山噴出物の体積は豊肥地域と比べると格段に少ない(横瀬ほか, 1999) .

2.2 九州南部

九州南部の火山岩類は、安山岩を主とし、中新世末以降、南九州西部で活動を開始し、約 2-3Ma に広域にわたって分布し、2Ma 以降、北北東 - 南南西方向に並ぶ霧島 - 桜島 - 阿多カルデラが形成する現在の火山フロントの位置に移動(Izawa and Watanabe, 2001)または収束してきた(横瀬ほか, 1998)。九州南部地域には現在の火山フロントの背弧側に火山フロントと平行な南北 100km, 東西 20km の鹿児島地溝が形成されている。その北端は九州南部の鮮新世火山岩類の分布範囲に一致し(第 1 図 a), 形成年代は鮮新世末 ~ 更新世前期と考えられている(早坂, 1987)。この鹿児島地溝内には大小数多くのカルデラが分布し、珩長質の火山噴出物により埋積されている(第 3 図)。

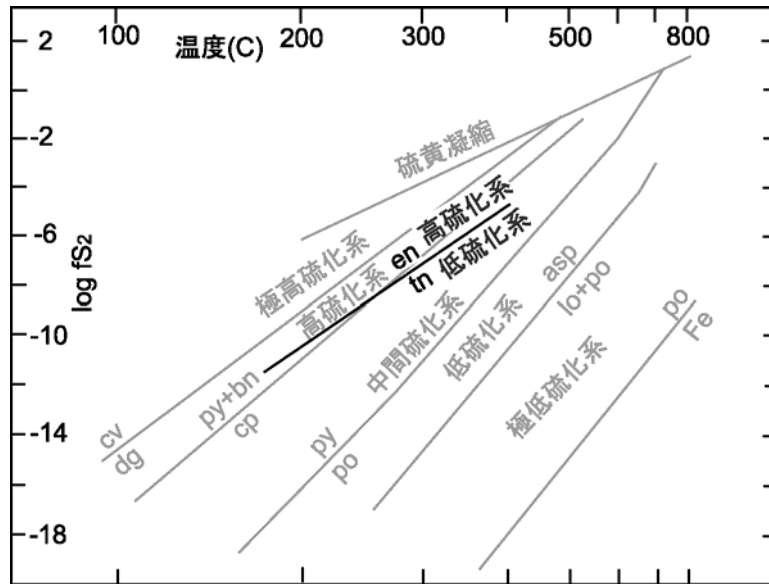


第 3 図 鹿児島地溝最北端部に位置する曾木の滝。約 2Ma の流紋岩質火砕流堆積物からなる。

鮮新世 ~ 更新世の火山活動は、主として火山フロント沿いの安山岩の複成火山群により特徴づけられ、背弧側には安山岩とともに、玄武岩、流紋岩 ~ デイサイトの溶岩の噴出も認められる(宇都・内海, 1997; 渡辺, 未公表資料)。鮮新世の安山岩 ~ デイサイトはカルクアルカリ系列が卓越するが、第四紀にはカルクアルカリとソレアイトとの中間組成のものが増加し(第 2 図; 永尾ほか, 1983), 更新世 - 完新世の玄武岩類の多くはソレアイト系列の組成を持つ(中田, 1986)。背弧の川内地域の玄武岩には、別府 - 島原地溝帯の第四紀の火山岩類と同じく、プレート内型と島弧型の両方の性質のマグマが含まれる(Kita et al., 2001)。

3. 浅熱水性金鉱床のタイプ・分布と年代 - 収縮する鉱床区と拡大する鉱床区

浅熱水性金鉱床は、金鉱化作用をもたらした熱水の性質に基づき、高硫化系と低硫化系に区分される(第 4 図; Hedenquist, 1987)。高硫化系鉱床は酸化的な熱水により形成され、明ばん石、パイロフィライト、ディッカイト等の変質鉱物と硫砒銅鉱・ルソン銅鉱・銅藍・黄鉄鉱の硫化鉱物組み合わせで特徴づけられる。



第4図 浅熱水性金鉱床の区分．Hedenquist (1987)による区分(黒色)と Einaudi et al. (2003)による区分(灰色). 鉱物名は以下の通り．asp: 硫砒鉄鉱, bn: 斑銅鉱, cp: 黄銅鉱, cv: 銅藍, dg: ダイジェナイト, en: 硫砒銅鉱, lo: レーリンジャイト, po: 磁硫鉄鉱, py: 黄鉄鉱, tn: 砒四面銅鉱．

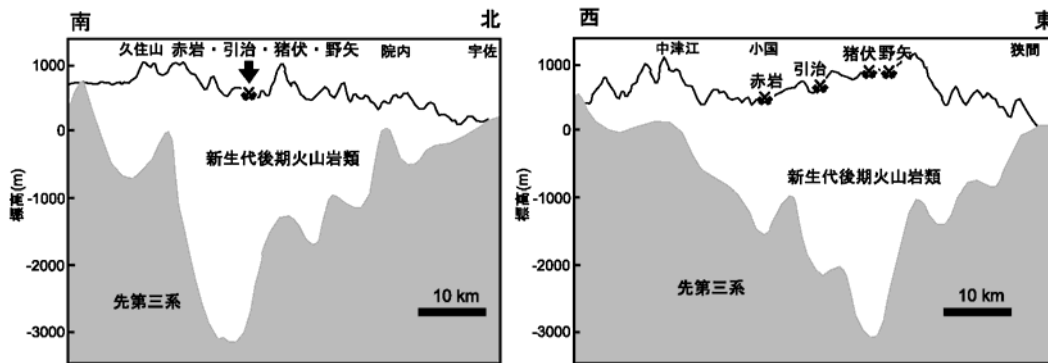
一方,低硫化系鉱床は氷長石・方解石・セリサイト等の変質鉱物と黄鉄鉱・黄銅鉱・砒四面銅鉱・四面銅鉱±磁硫鉄鉱±硫砒鉄鉱・閃亜鉛鉱等の多様な硫化鉱物で特徴づけられる．最近,これまでの低硫化系を磁硫鉄鉱や硫砒鉄鉱を含む低硫化系とこれらの鉱物を含まない中間硫化系に区分する提案も行われているが(第4図; Einaudi et al., 2003),ここでは従来の区分を踏襲する．

これらの浅熱水性鉱床のタイプは熱水の異なる酸化 - 還元状態を反映するのみでなく,異なるテクトニックセッティング・火成活動のもと形成されることが米国西部を始め世界各地で報告されている(Sillitoe and Hedenquist, 2003)．リフティングに伴うソレライト系列の玄武岩と流紋岩とのバイモーダル火成活動域に磁硫鉄鉱や硫砒鉄鉱の産出で特徴づけられる低硫化系鉱床が,海洋プレートの沈み込みに伴うカルクアルカリ安山岩活動域に高硫化系鉱床や磁硫鉄鉱や硫砒鉄鉱を含まない比較的硫黄フュガシティの高い低硫化系鉱床が分布する(John, 2001; Watanabe, 2002)．

九州では磁硫鉄鉱の産出で特徴づけられる典型的な低硫化系鉱床は見当たらない．このことは玄武岩 - 流紋岩のみからなるバイモーダル火山活動が顕著でないことと一致する．

北九州浅熱水性金鉱床区では,豊肥火山地域と島原地域の2箇所に分かれて金鉱床が分布する．そのほとんどが低硫化系の特徴を示し,国東半島の更新世両子火山中心部の真玉・赤根鉱床のみが高硫化系の特徴を持つ(第1図)．

豊肥地域では,国東半島の付け根の鶴成鉱床が 5.3-5.4Ma と最も古い年代を示し,3Ma には豊肥地域の縁辺部に沿って広い範囲で鉱化作用が認められる．3Ma 以降には豊肥地域の中心西部の星野地域に,さらに 1Ma 以降には地域の中心部の引治地域にのみ鉱化熱水作用が認められる(第1図 b)．引治地域では,豊肥地域の地溝の中でも火山岩類が最も厚く埋積し,かつ火山フロント背弧側の黒雲母流紋岩の分布地に,赤岩,引治,猪伏,野矢の4鉱床が東西に並んでいる(第5図)．このように豊肥火山地域では,鮮新世から更新世にかけて金鉱床の分布範囲は時代とともに縮小しており,これらの鉱床から生産された金銀量も鮮新世に比べて第四紀は極端に少ない(第2表)．



第5図 豊肥地溝の断面図(Kamata, 1989)と第四紀浅熱水性鉱床の位置。各鉱床の位置は、これらの断面線に投影されている。

南九州浅熱水性金鉱床区には、安山岩を母岩とする春日・岩戸・赤石高硫化系鉱床が西南部に分布する(第1図)。これらの鉱床には明ばん石やパイロフィライト等からなる酸性変質帯が伴われている(Hedenquist et al., 1994)。同じく安山岩を母岩とする低硫化系の串木野鉱床では、その東方2-4kmには鉱床と同時期に形成された酸性変質帯が分布し(Izawa and Zeng, 2001)、高重力異常と合わせて、その下部に鉱化作用に関連したマグマが貫入したと考えられている(Morishita and Kodama, 1986)。

本鉱床区の中中部 - 東部には菱刈鉱床を始めとする低硫化系鉱床が数多く分布する(第1図)。西部の高硫化系・低硫化系鉱床が5.5-3.7Ma、中 - 東部の低硫化系鉱床が2.3-0.5Maの年代を示し、金鉱化作用の及んだ領域は、中新世最末期から第四紀にかけて鉱床区西部から東部に、また火山帯に沿って南北にも拡大している(第1図b)。銀/金比は時代とともに小さくなる(第2表)。このように北九州浅熱水性金鉱床区と南九州浅熱水性金鉱床区では、鮮新世から第四紀にかけて、鉱床区の縮小と拡大という正反対の現象が起こっている。

第2表 北・南九州浅熱水性金鉱床区における火成活動・構造運動の変遷と金鉱化作用

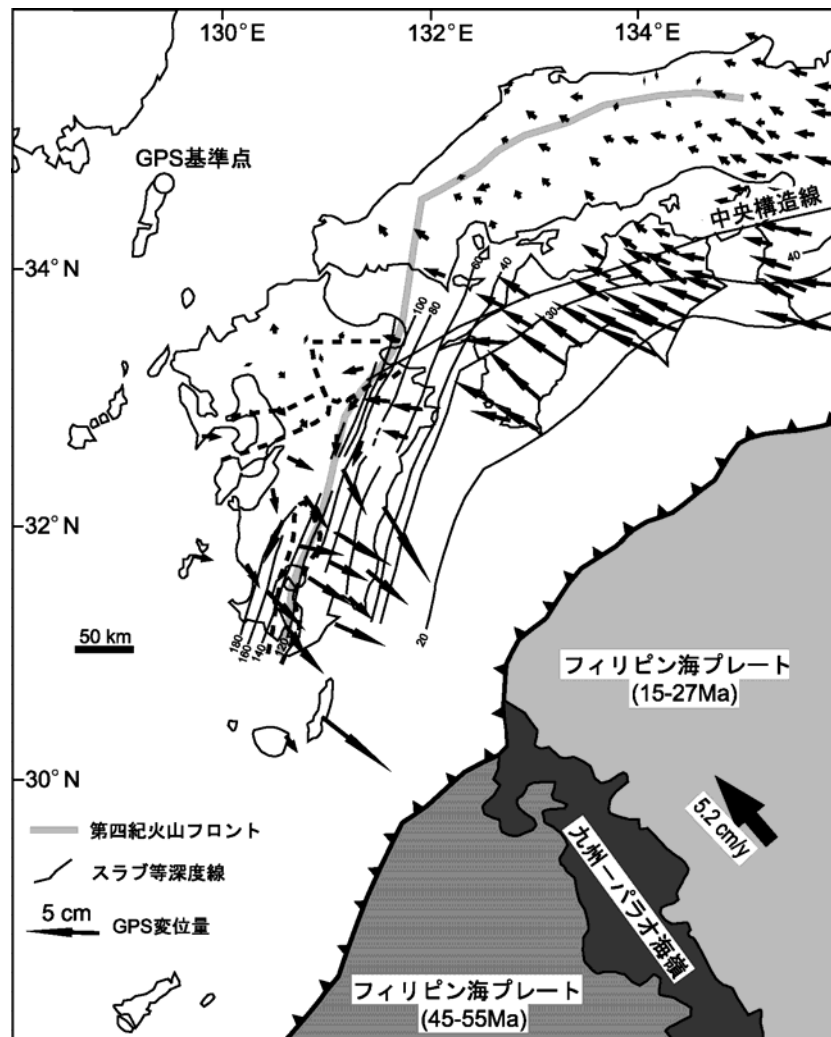
時代	北九州浅熱水性金鉱床区		南九州浅熱水性金鉱床区	
	鮮新世	第四紀	鮮新世	第四紀
構造運動	地溝形成活発・東西正断層運動	地溝形成不活発	地溝形成不活発	地溝形成活発
構造場	南北引張	東西圧縮	?*	北西 - 南東引張
火山活動域・噴出量	火山活動域縮小・北北東 - 南南西の火山フロント形成・噴出量の減少		北北東 - 南南西火山フロントの東方への移動・噴出量変化不明	
火山活動様式	単成火山	複成火山(火山フロント)	複成火山(火山フロント~背弧)	複成火山(火山フロント) 単成火山(背弧)
主要火山岩類	安山岩・デイサイト	安山岩・デイサイト(火山フロント) 流紋岩(背弧)	安山岩・デイサイト・流紋岩	安山岩・デイサイト・玄武岩(火山フロント) 流紋岩・デイサイト・玄武岩(背弧)
マグマ系列	カルクアルカリ卓越	カルクアルカリ+ソレアイト	カルクアルカリ卓越	カルクアルカリ+ソレアイト
鉱床区域変化	鉱床区域縮小・収束		鉱床区域東方へ拡大	
主要鉱床型	低硫化系	低硫化系	高硫化系・低硫化系	低硫化系
代表的鉱床	鯛生	引治	串木野・山ヶ野・春日	菱刈・大口
産金銀量(t)	金: 52.1, 銀: 215.0	金: 0.6, 銀: 0.9	金: 110.1, 銀: 528.7	金: 282.2, 銀: 225.0
銀/金	4.1	1.5	4.8	0.8

* Yamaji (2003)は前弧域で鮮新世初期に北東-南西または東北東-西南西方向の圧縮構造場の存在を示唆。

鉍化年代と鉍床周辺の火山岩の年代を比較すると、北九州鉍床区の小鹿田 - 山国地区や星野地区、有田 - 波佐見地区では、火山岩類の噴出年代より数 10 万年遅れて熱水活動および鉍化作用が認められている(関根ほか, 1995; 沢井ほか, 1998; 前田ほか, 1996)。一方、北九州鉍床区の引治地区(佐藤ほか, 1991)や南九州鉍床区の菱刈地区(金属鉍業事業団・住友金属鉍山株式会社, 1987)では鉍化作用とほぼ同時の火山活動が認められている。火成活動と鉍化作用との直接的な因果関係を議論するにはより詳細な検討が必要である。

4. 九州周辺の鮮新世 - 第四紀地殻変動と鉍化作用

対馬を不動点とした GPS による九州の地殻表層部の水平方向の動き(西村ほか, 1999)を見ると、南九州では鹿児島地溝西端を境界として、東側の地塊が大きく太平洋に向かって南西に移動している。一方宮崎 - 大分県境付近から北の地塊は逆に西北西に移動し、全体として九州外帯は反時計回りに回転している(第 6 図)。この結果は、現在の地殻表層部が鹿児島地溝帯では大きく伸張しているのに対し、豊肥地域では短縮していることを示す。一方、島原地溝帯では北西 - 南東方向に地殻がやや伸張している。このような地殻表層の回転運動は堆積岩の古地磁気の計測でも検出され、九州外帯は内帯に対して 2-3Ma 以降、約 30°反時計回りに回転したことが示されている(Kodama et al., 1995)。



第 6 図 西南日本の GPS による 1996 年～1997 年の地殻変動(西村ほか, 1999)と沈み込むフィリピン海プレートの年代(Okino et al., 1999; Hilde and Lee, 1984)、およびスラブ等深度線(馬場, 2002; 石田・坂無, 2003)。

九州外帯の反時計回りの回転運動は、沈み込むフィリピン海プレートのスラブの角度の違いに起因する。深発地震面の等深度線に示されるように、九州では沈み込むプレートスラブの角度は急傾斜であり、スラブによる海溝側への引っ張り(slab pull)のために前弧部分が海溝側に移動し(Yamaji, 2003)、火山弧の部分で地殻の伸張が生じたと考えられる。

一方、西南日本弧では、深発地震が約 40km の深さまでしか発生していないが、深発地震面が追跡される四国以南の地域では、沈み込みスラブは極めて緩傾斜であり(第 6 図)、上盤プレートとの間で強い結合が生じている。このため、沈み込むスラブに引きずられ上盤プレートに相当する四国が西方へ変位し、九州北部(豊肥地域)の短縮をもたらしている。このような九州北部および南部の異なる構造運動が、結果として九州外帯を反時計回りに回転させている。

九州南部および中国・四国地方に見られる異なるプレートの沈み込み様式は、九州 - パラオ海嶺北東側での浮力を持つ新しい年代(15-27 Ma; Okino et al., 1999)のスラブの沈み込みと南西側での負の浮力を持つ古い年代(45-55 Ma; Hilde and Lee, 1984)のスラブの沈み込みに起因する(西村ほか, 1999)。

現在の九州 - パラオ海嶺の位置を北北西に延長すると九州北部の島原地域は海嶺南西側の古いスラブの沈み込む領域に含まれる。北部九州で豊肥地溝が鮮新世に、島原地溝が第四紀に主として活動していることはこの年代の異なるプレートの沈み込みを反映しているのかもしれない。

伸張領域での火山活動に主として伴われる低硫化系鉱床が、第四紀に豊肥地域では極めて限られた場所にしか形成されていないのに対し、九州南部では鹿児島地溝に沿って数多く形成されていることは、第四紀の九州の地殻変動と調和的である。

さらに九州南部の構造運動、火成作用および鉱化作用に大きな影響を与えたのが、九州 - パラオ海嶺の沈み込みであろう。Yamaji (2003)が見積もったように九州 - パラオ海嶺の沈み込みの位置が鮮新世から第四紀に北上したとすると、九州南部では、浮力のある海嶺の沈み込む場から、負の浮力を持つ古い海洋プレートの沈みこむ場へと変化する。この変化が、結果として火成活動域の東進、マグマの性質や噴出形態・広域応力場の変化、地溝の発達および鉱化作用の様式や領域の変化をもたらしたと推定される。南九州地域において火山活動域の東方への急激な移動(または拡大)が南の南薩地域で約 3Ma と早く、北の北薩地域で約 2Ma(Izawa and Watanabe, 2001)とやや遅れたことは、九州 - パラオ海嶺の沈み込みの場が南から北に移動したと調和的である。

6. おわりに

鉱床探査には、従来から行われている物理探査や地化学異常探査に加えて、地域のテクトニクスを理解することも重要である。九州の浅熱水性金鉱化作用は地域のテクトニクスと密接な関係を持っており、菱刈鉱床を始めとする低硫化系鉱床は、地溝形成と火山フロント - 背弧火成活動の活発な地域・時期に形成されている。九州が日本で最も金に富む島になった原因は、鮮新世以降、各地で伸張運動に伴う地溝が形成されたために他ならない。

鮮新世から第四紀にかけての地殻変動と火山活動は、島原地域も低硫化系鉱床の形成に適していることを示している。果たして島原地域に有望な鉱床が存在するのかどうか興味のもたれるところである。

本原稿は井沢英二九州大名誉教授と産業技術総合研究所森下祐一博士に査読していただき、その内容を大いに改善することができた。両査読者に感謝の意を表します。

文献

- 馬場俊孝(2002): 沈み込むフィリピン海プレートの形状 . 月刊地球号外 No. 38, p. 77-81.
- Einaudi, M., Hedenquist, J. W. and Inan, E. E. (2003): Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments. Society of Economic Geologists Special Publication, No. 10, p. 285-313.
- 古川雅英(1991): 琉球弧と沖縄トラフの発達史 . 地学雑誌, v. 104, p. 552-564.
- Garwin, S., Hall, R. and Watanabe, Y. (in press): Tectonic Setting, geology and gold and copper mineralization in Cenozoic magmatic arcs of Southeast Asia and the West Pacific. Economic Geology 100th Anniversary Volume.
- 早坂祥三(1987): 鹿児島湾の地質構造 . 地団研専報, 33 号, p. 225-233.
- Hedenquist, J. W. (1987): Mineralization associated with volcanic-related hydrothermal systems in the Circum-Pacific Basin. Circum Pacific Energy and Mineral Resources Conference, 4th, Singapore, August 1986, Transactins, P. 513-524.
- Hedenquist, J. W., Matsuhisa, Y., Izawa, E., White, N. C., Giggenbach, W. F. and Aoki, M. (1994): Geology, geochemistry, and origin of high sulfidation Cu-Au mineralization in the Nansatsu district, Japan. Economic Geology, v. 89, p. 1-30.
- Hilde, T. W. C. and Lee, C-S. (1984): Origin and evolution of the west Philippine basin: A new interpretation. Tectonophysics, v. 102, p. 85-104.
- Hoang, N. and Uto, K. (2003): Geochemistry of Cenozoic basalts in the Fukuoka district (northern Kyushu, Japan): implications for asthenosphere and lithospheric mantle interaction. Chemical Geology, v. 198, p. 248-268.
- 石田瑞穂・坂無雅子(2003): フィリピン海スラブの形状 - 関東平野から九州地域まで - . 月刊地球, v. 25, p. 168-172.
- Izawa, E. and Watanabe, K. (2001): Overview of epithermal gold mineralization in Kyushu, Japan. Society of Economic Geologists Guidebook Series, v. 34, p. 11-15.
- Izawa, E. and Zeng, N. (2001): Kushikino gold mineralization in a Pliocene volcanic region, Kyushu, Japan. Society of Economic Geologists Guidebook Series, v. 34, p. 53-60.
- John, D. A. (2001): Miocene and Early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the northern Great Basin, Western United States: Characteristics, distribution, and relationship to magmatism. Economic Geology, v. 96, p. 1827-1853.
- 鎌田浩毅(2003): 岩盤としてのフィリピン海プレートの沈み込みと西南日本列島の形成 . 材料, v. 52, p. 444-451.
- Kamata, H. (1989): Volcanic and structural history of the Hohi volcanic zone, central Kyushu, Japan. Bulletin of Volcanology, v. 51, p. 315-332.
- Kamata, H. (1998): Quaternary volcanic front at the junction of the South-west Japan Arc and the Ryukyu Arc. Jour. Asian Earth Science, v. 16, p. 67-75.
- 木下亀城編(1961): 日本地方鉱床誌第9巻九州地方 . 朝倉書店, 695p.
- 金属鉱業事業団・住友金属鉱山株式会社(1987): 菱刈鉱山の発見と開発 . 鉱山地質, v. 37, p. 227-236.
- Kita, I., Yamanoto, M., Asakawa, Y., Nakagawa, M., Taguchi, S. and Hasegawa, H. (2001): Contemporaneous ascent of within-plate type and island-arc type magmas in the Beppu-Shimabara graben system, Kyushu island, Japan. Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 111, p. 99-109.
- Kodama, K., Tashiro, H. and Takeuchi, T. (1995) Quaternary counterclockwise rotation of south Kyushu, southwest Japan. Geology, v. 23, p. 823-826.
- Kusumoto, S., Takemura, K., Fukuda, Y. and Takemoto, S. (1999): Restoration of the depression structure at the eastern part of central Kyushu, Japan by means of dislocation modeling. Tectonophysics, v. 302, p. 287-296.
- 前田勝彦・渡辺公一郎・井沢英二・板谷徹丸・武内浩一(1996): 西九州, 有田 - 波佐見地域の金鉱化作用と粘土化作用の K-Ar 年代 . 資源地質, v. 46, p. 25-31.

- Morishita, Y. and Kodama, K. (1986): Simulation analysis of the gold-quartz vein systems in the Kushikino Mine area, southern Kyushu, Japan. *Mining Geology*, v. 36, p. 475-485.
- 永尾隆志・山元正継・藤林紀枝・阪口和之・長谷義隆・長嶺 智・半田正敏(1983): 肥薩・北薩火山岩類および構成鉱物の化学組成の広域変化. *MAGMA*, v. 69, p. 1-9.
- 永尾隆志・木戸道男・沢井長雄(2000): 大分県杵築地域に分布する Nd に富む安山岩. 山口大学機器分析センター報告, 第 9 号, p. 27-32.
- 中田節也(1986): 九州に分布する霧島・大山両火山帯岩石の化学組成の比較研究. *火山第 2 集*, v. 31, p. 95-110.
- Nakada, S. and Kamata, H. (1991): Temporal change in chemistry of magma source under Central Kyushu, Southwest Japan: progressive contamination of mantle wedge. *Bulletin of Volcanology*, v. 53, p. 182-194.
- 西村 宗・安藤雅孝・宮崎真一(1999): 南海トラフ沿いのプレート間カップリングと九州南部の南東向き運動について. *地震第 2 輯*, v. 51, p. 443-456.
- Okino, K., Ohara, Y., Kasuga, S. and Kato, Y. (1999): The Philippine Sea: New survey results reveal the structure and the history of the marginal basins. *Geophysical Research Letters*, v. 26, p. 2287-2290.
- 佐藤 彬・中村研治・西川信康・木田祥治・竹之内耕・宮武修一・松木正義(1991): 九州中部地域における金鉱化作用 - 特に引治鉱山周辺の調査成果について - . *鉱山地質*, v. 41, p. 109-125.
- 沢井長雄・松村法行・板谷徹丸(1998): 九州北中部, 星野金鉱床地域の火山岩と金鉱床の K-Ar 年代. *地質学雑誌*, v. 104, p. 377-386.
- 沢井長雄・河村博之・永尾隆志(2002): 大分県馬場金鉱床に分布する Nb に富む安山岩. *資源地質学会第 52 回年会講演会講演要旨集*, O-47.
- 関根亮太・井沢英二・渡辺公一郎・板谷徹丸(1995): 北部九州, 小鹿田 - 山国金鉱床地域の火山活動・熱水変質作用の時期. *資源地質*, v. 45, p. 295-302.
- Sillitoe, R. H. and Hedenquist, J. W. (2003): Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. *Society of Economic Geologists Special Publication*, No. 10, p. 315-343.
- 須藤定久・渡辺 寧・小村幸次郎(2003): 鉱物資源図「九州」. 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 多田 堯(1985): 沖縄トラフの拡大と九州地方の地殻変動. *地震第 2 輯*, v. 38, p. 1-12.
- 宇都浩三・内海 茂(1997): 鹿児島県樋脇町丸山溶岩円頂丘の K-Ar 年代: 琉球弧第 2 列目の第四紀火山. *火山*, v. 42, p. 299-302.
- Watanabe, Y. (2002): Late Cenozoic metallogeny of southwest Hokkaido, Japan. *Resource Geology*, v. 52, p. 191-210.
- Yamaji, A. (2003): Slab rollback suggested by latest Miocene to Pliocene forearc stress and migration of volcanic front in southern Kyushu, northern Ryukyu Arc. *Tectonophysics*, v. 364, 9-24.
- 横瀬久芳・菊池 航・永尾敬介・小玉一人(1998): 九州南西部矢筈岳火山岩類の K-Ar 年代. *岩鉱*, v. 93, p. 151-161.
- 横瀬久芳・梁島達也・菊池 航・杉山直史・篠原 章・竹内 徹・永尾敬介・小玉一人(1999): 別府 - 島原地溝帯西部域の過去 5 百万年間に於ける間欠的火山活動. *岩鉱*, v. 94, p. 338-348.