

西南日本外帯における 層状含銅硫化鉄鉱床形成史についての研究 — 三波川帯野々脇と四万十帯北帯三尾鉱床の 地質・変成作用について —

湯川 正敏[†]

Study on the Metallogenic Evolution of Cupriferous iron sulphide deposits in the Outer Zone of Southwest Japan - Geology and Metamorphism of the Nonowaki Deposit in the Sambagawa Belt and the Mio Deposit in the Northern Shimanto Belt -

Masatoshi Yukawa

1. はじめに

本邦には中生代～古生代の塩基性火山岩類に関連する層状含銅硫化鉄鉱床が分布する。この鉱床は古くはキースラーガー (kieslager) と呼ばれた。近年は、国際的にも別子型鉱床と呼ばれることも多い。別子鉱山を中心とする層状含銅硫化鉄鉱床の研究は明治時代に始まる。1950年代まで同生鉱床説（鉱床の生成が母岩と同時期とする説）と後生鉱床説（母岩の形成後に鉱床が生成したとする説）の論争が続いたが、地質調査により層準規制型鉱床であることが明らかになり同生説が定着した。その後、プレートテクトニクス論の進展とともに、このタイプの鉱床の形成場について論じられるようになったが、鉱山の閉山にともない研究が停滞している。

本研究は、三波川帯野々脇鉱床と四万十帯北帯三尾鉱床を中心に調べた（図1）。特に、野々脇鉱床では鉱層とその

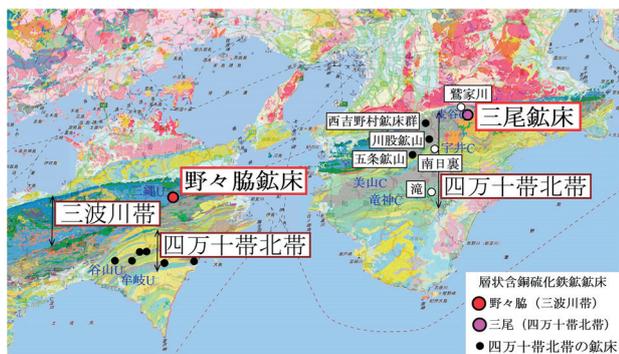


図1 調査地域と地質区分 地質図は地質調査総合センター(2019)を引用

上下の緑色片岩が露出する貴重な露頭を観察できる。両鉱床母岩の塩基性岩類についてその岩石学的性質を調べ形成場について論じることとする。近年、三波川帯および四万十帯の層状含銅硫化鉄鉱床のRe-Osアイソクロン年代が求められ鉱床の生成年代について大きな進展があった。さらに、広域変成作用の影響で堆積年代が不明であった三波川帯、四万十帯北帯において碎屑岩中のジルコン碎屑物からU-Pb年代が求められ付加年代も議論できるようになった。本研究では近年のこのような成果を背景に、野々脇鉱床と三尾鉱床の形成史を論じる。

2. 地質概略

2.1 四国三波川帯野々脇鉱床周辺の地質

野々脇地域は四国東部三波川帯にあり三縄ユニットに属する。層状含銅硫化鉄鉱床は高越層に多く分布するが、野々脇層には野々脇鉱床以外には乏しく、小規模な鉱床がいくつかあるのみである。野々脇鉱床を胚胎する野々脇緑色片岩層は三縄ユニット（下部サブユニット下部）の一部に属す（図2）。

2.2 紀伊半島中央部三尾鉱床周辺の地質

西南日本外帯の地質帯の配置は、中央構造線から南へ三波川帯、秩父帯、四万十帯の順序で配置するが、紀伊半島中央部では中央構造線をはさんで嶺家帯に白亜系四万十帯北帯が接している（図1）。

三尾鉱床が位置する紀伊半島中央部吉野地域においては、北側から南側へ、三波川帯（香東コンプレックス・色

[†]2022年度修了（自然環境科学プログラム）

西南日本外帯における層状含銅硫化鉄鉱床形成史についての研究
 — 三波川帯野々脇と四万十帯北帯三尾鉱床の地質・変成作用について —

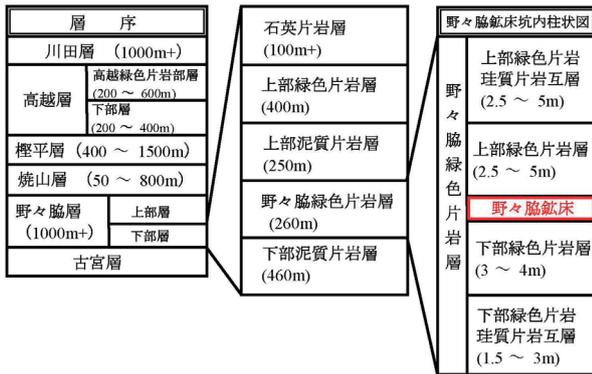


図2 野々脇周辺の層序 括弧内は層厚を示す 中川・河井 (1963) 金属鉱物探査促進事業団 (1971) をもとに作成

生コンプレックス), 四万十帯北帯 (麦谷コンプレックス) が分布する (志村ほか, 2020)。四万十帯北帯麦谷コンプレックスは千枚岩質の泥質岩, 砂岩・泥岩互層, チャートや玄武岩などからなるが, さらに構造的上位のMg1 ユニットと下位のMg2 ユニットに細分されている。三尾鉱床はMg1・Mg2 ユニット境界付近に分布する。

3. 野々脇鉱床・三尾鉱床について

3.1 鉱床概説

野々脇鉱床はJR徳島線穴吹駅の南東約10kmの徳島県美馬市野々脇にある。鉱床周辺は無点紋結晶片岩類からなり, 鉱床は野々脇緑色片岩層中にある。胚胎層準は野々脇緑色片岩層と下部の黒色片岩層境界より4~7m上位の一定層準にある。鉱床の直上下数mは緑色片岩で整合的な関係となっている (写真1 図2)。

三尾鉱床は, 近畿日本鉄道吉野線大和上市駅東南東約15 kmの奈良県吉野郡東吉野村三尾にある (図1)。本地域は四万十帯北帯麦谷コンプレックスに属し泥質千枚岩を主とする。鉱床は玄武岩質火山岩およびハイアロクラスタイトを原岩とする千枚岩中に整合的に産出する。

3.2 鉱石鉱物

野々脇鉱床, 三尾鉱床の鉱石は, 主に黄鉄鉱・黄銅鉱・

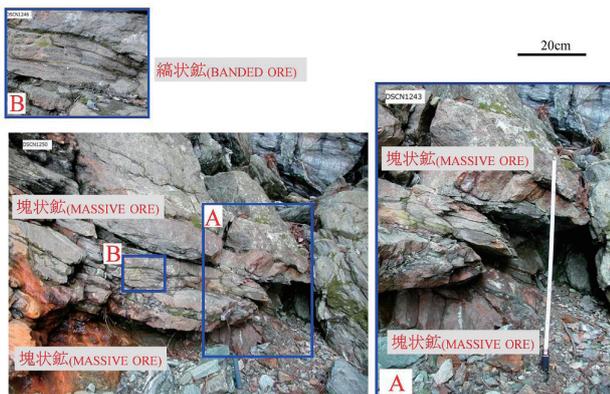


写真1 野々脇鉱床露頭 塊状鉱 (2枚) と縞状鉱 鉱層の上下は緑色片岩

閃亜鉛鉱・磁硫鉄鉱からなる。磁硫鉄鉱は三波川帯の低変成度地域, 秩父帯および四万十帯の層状含銅硫化鉄鉱床に特徴的に観察されるが, 普遍的に出現するのではなく一部の鉱床にのみ出現する。今回調査した四万十帯北帯五条鉱山, 川股鉱山では産出しない。

野々脇鉱床において黄鉄鉱が鉱石の大部分をしめる。比較的自形性の強い黄鉄鉱Iが主であり粒径は数100 μ mに達する (写真2右)。一部微細 (粒径数10 μ m以下) な黄鉄鉱IIも見られる。黄鉄鉱の粒径は三尾鉱床より大きい。

三尾鉱床においても黄鉄鉱は自形~半自形をなし比較的粒径が大きい黄鉄鉱I (数100 μ mに達する) と丸みを帯びた粒径数10 μ m以下の微粒子状黄鉄鉱IIに分けられる (写真2 左)。黄鉄鉱IIは黄鉄鉱Iのまわりをフランボイダル状に取り囲む産状を呈する。変成度が高くなると黄鉄鉱IIが見られなくなることから, 続成作用から弱変成作用において黄鉄鉱IIから黄鉄鉱Iが成長すると考えられる。黄鉄鉱IIで見られるフランボイダル状組織は低変成度鉱床で一般的に観察され, 鉱床生成時の初生的組織を保存していると考えられる。

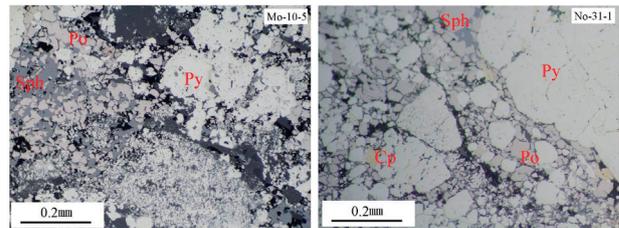


写真2 鉱石鉱物の産状 左: 三尾 右: 野々脇
 Py: 黄鉄鉱 Po: 磁硫鉄鉱 Sph: 閃亜鉛鉱 Cp: 黄銅鉱

4. 三波川帯野々脇鉱床母岩の岩石化学的性質

今回, 野々脇鉱床母岩の緑色片岩および周辺の泥質片岩について主要元素および一部の希土類元素を含む微量元素について蛍光X線分析装置 (リガク製zxsx-101e, 広島大学) により全岩化学組成分析を行った (湯川, 2023 付表2)。分析したのは鉱床上盤・下盤の6試料と鉱床胚胎層と同一層準および下位層準の緑色片岩2試料, また鉱床周辺の泥質片岩2試料である。以下に緑色片岩類の地球化学的特徴について述べる。

鉱床母岩および近傍の緑色片岩のSiO₂含有量は40.28~51.27wt%で玄武岩に相当する。鉱床上盤の一部に珪化作用を受けた玄武岩 (SiO₂含有量が59.38, 60.83wt%) が存在する。主要酸化物組成をもとに玄武岩の分類を行うとTiO₂-FeO*/MgO図 (図3) においては大部分がMORB領域にプロットされる。

広域変成岩や変質を被る岩石の場合, 二次的な組成変化を被る可能性がある。その影響をしらべるために影響を受けにくいHFS元素 (high field-strength element) であるZrを基準にスパイダー図に用いるいくつかの元素を調べた。HFS元素のTi・Y・NbとLIL元素 (large-ion lithophile

element) のK・Rb・Srである。その結果を(図4)に示す。上段にHFS元素, 下段にLIL元素をそれぞれ示している。HFS元素の代表的な元素であるZrは, 風化・変成作用に関して移動しにくい元素であり, 結晶分化作用において造岩鉍物に対して高い不適合性を持っている。図4上段においてZr濃度とTi, Y, Nb濃度は正の相関性があることがわかる。つまり, これらのHFS元素はZrと同様の挙動をしていると推定できる。図4下段においてZr濃度に対するLIL元素の相関性は認められない。LIL元素のK・Rb・Srは二次的な組成変化を被っていることを意味する。今回作成したスパイダー図においてもLIL元素は初生的な元素成分を変化させていると判断し, 読み取りから除外した。

微量元素およびREE元素をもとにした, スパイダー図(図5)を示す。横軸はSun and MacDonough (1989) に従い, メルトに対して親和性の高い元素(不適合の度合いが大きい元素)ほど左側に, 低い元素ほど右側に配置している。この図はN-MORB (normal mid-ocean ridge basalt) で規格化している。また, 比較のためにE-MORB (enriched mid-ocean ridge basalt) OIB (oceanic island tholeiite) の値も示している。野々脇地域の鉍床母岩や周辺の緑色片岩のスパイダー図は, Rb, Ba, K, SrなどのLIL元素はその値が全体的に高く変化幅も大きい。一方,

Ti, YなどのHFS元素の値は低く変化幅も小さい。変質によって動きにくいHFS元素で判断すると, 野々脇周辺の緑色片岩はOIB (oceanic island basalt) とは明瞭に区別されN-MORBもしくはE-MORBであると判断される。

次に地球化学的判別図を示しマグマ生成のテクトニック場について述べる。各種の地球化学的判別図が発表されているが, 今回の検討においてはRb, Ba, K, Srなどの移動性の高い元素をふくむ図は使用していない。Rollinson (1993) によるTi-V図(図6)を示したが, 白丸で示した珪化質塩基性片岩の値以外はMORBかBABB (back arc basin basalt) の領域にプロットされる。Tatsumi et al. (1998) はNb/Zr-Nb/Y図を用いてHIMU玄武岩, OIBおよびMORBが識別できることを示した。鉍床母岩を含む野々脇地域の緑色片岩はすべてMORB領域に入る(図7)。また, Meschede (1986) によるNb-Zr-Y図(図8)では一部がIAB (island arc basalt) +WPT (within-plate tholeiite) の領域にプロットされるが, 主にN-MORB領域に入る。

以上に示した野々脇鉍床母岩およびその周辺の緑色片岩の主要酸化物組成, 微量元素およびREE元素組成の特徴から, この玄武岩はOIB (oceanic island basalt) やIAT (island arc tholeiite) とは明瞭に異なった組成的特徴を有しN-MORBとしての特徴をしめすと結論できる。

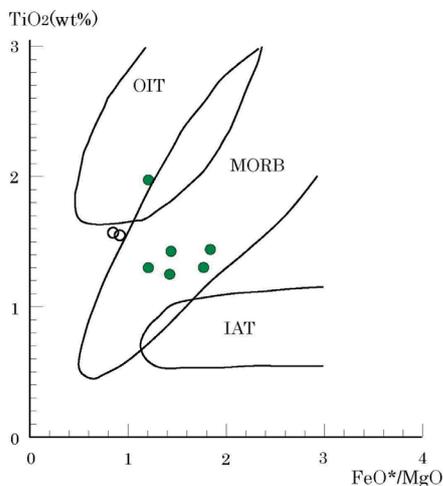


図3 野々脇鉍床緑色片岩(緑丸)のTiO₂-FeO*/MgO図 OIT(oceanic island tholeiite) MORB(mid-ocean ridge basalt) IAT(island arc tholeiite) の区分は Miyashita et al.(1995) による FeO*=total iron as FeO 白丸は珪化質緑色片岩

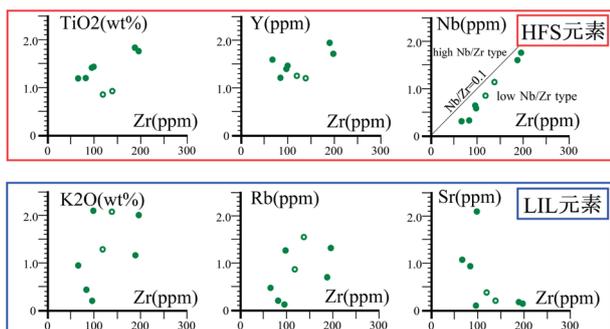


図4 Zr組成に対するHFS元素, LIL元素の組成変化図 野々脇鉍床緑色片岩(緑丸); 珪化質塩基性片岩(白抜き)

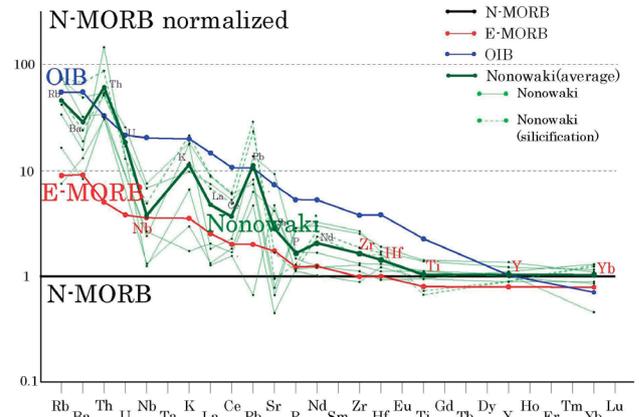


図5 N-MORB規格化スパイダー図(野々脇緑色片岩)規格化に用いたN-MORBおよびE-MORB, OIBの値はSun and McDonough (1989) から引用

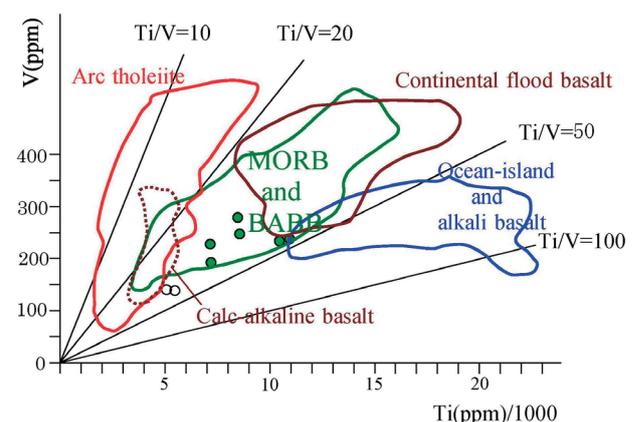


図6 野々脇鉍床緑色片岩(緑丸)のTi-V図 各区分はRollinson(1993)による 白丸は珪化質緑色片岩

西南日本外帯における層状含銅硫化鉄鉍鉍床形成史についての研究
— 三波川帯野々脇と四万十帯北帯三尾鉍床の地質・変成作用について —

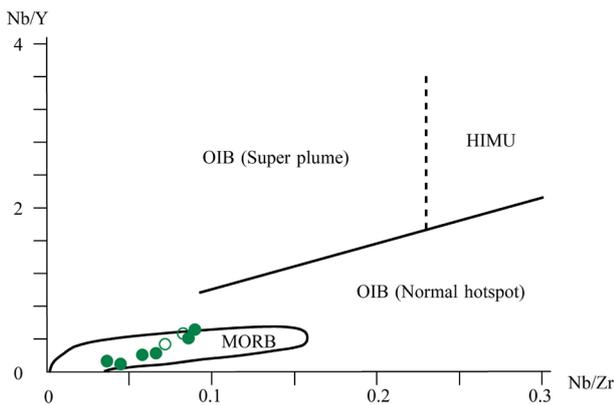


図7 野々脇鉍床緑色片岩(緑丸)のNb/Zr-Nb/Y図
Tatsumi et al. (1998)による 白丸は珪化質緑色片岩

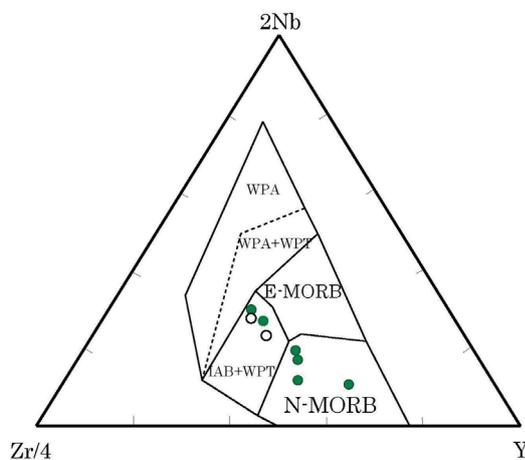


図8 野々脇鉍床緑色片岩(緑丸)のNb-Zr-Y図
Meschede(1986)による 白丸は珪化質緑色片岩

5. 四万十帯北帯三尾地域の緑色岩類について

5.1 三尾地域緑色岩類の組織

紀伊半島四万十帯北帯の緑色岩類について、層状含銅硫化鉄鉍鉍床との関連の有無に注目し残留単斜輝石の化学組成を検討した。鉍床に関連するものは三尾鉍山、川股鉍山、五条鉍山の各サンプル、直接関連性がないものは鷺家川、南日裏、滝のサンプルである(図1)。緑色岩類は玄武岩質で単斜輝石や斜長石斑晶はあまり変質せず残存しているが、かんらん石斑晶はすべて二次鉍物に置換されている。石基はインターサータル～インターグラニューラー組織を呈する。斜長石は長柱状～短冊状、単斜輝石は自形～半自形の短柱状結晶で粒径は0.5～1.0mm程度であり、結晶の晶出順序は斜長石、単斜輝石の順である。これらの結晶の粒間は細粒の不透明鉍物等で埋められている。三尾鉍山周辺の緑色岩類はチャートに伴い、玄武岩質ハイアロクラスタイトも存在する。

5.2 紀伊半島四万十帯北帯緑色岩の残留単斜輝石

Leterrier et al. (1982) は世界の様々なテクトニック環境から産出する単斜輝石について1225の組成データからTi-Cr-Ca-Al-Na判別図を提案し、残留単斜輝石のデータ

から母岩の化学的性格が判別できることを示した。第一判別図であるTi-(Ca+Na)図はアルカリ玄武岩と非アルカリ玄武岩(ソレアイト～カルクアルカリ玄武岩)を判別し、第二判別図の(Ti+Cr)-Ca図では非アルカリ玄武岩についてMORBなどの発散域のソレアイトと島弧玄武岩を区分できるとした。

紀伊半島四万十帯北帯の玄武岩中の残留単斜輝石の組成について広島大学のEPMAで分析した。分析は四万十帯北帯から採取した6試料を対象とし、四万十帯北帯最北部に分布する三尾鉍山、五条鉍山、川股鉍山の鉍床母岩(玄武岩)を扱った。また、鉍床に関係しない玄武岩として三尾地域の鷺家川と南日裏サンプル、四万十帯北帯最南部の滝サンプルについても分析した。単斜輝石は主にaugiteの組成範囲に相当するが、鷺家川のサンプルだけアルカリ玄武岩特有のdiopside組成である。

5.3 紀伊半島四万十帯北帯玄武岩類のマグマ型

紀伊半島四万十帯北帯玄武岩類の残留単斜輝石をLeterrierのTi-(Ca+Na)第一判別図(図9)にプロットしたところ、鷺家川サンプルはアルカリ玄武岩と推定できる。川股・滝サンプルは非アルカリ玄武岩、それ以外の三尾・五条・南日裏サンプルはアルカリ-非アルカリ玄武岩にまたがる領域に分布する。鷺家川サンプルの残留単斜輝石は褐色の軸色を呈しTi含有量が高くアルカリ岩中の輝石特有の性質を示す(湯川, 2023 付表1)。

アルカリ-非アルカリ岩にまたがる領域の三尾・五条・南日裏サンプルについては別の手法で検討した。高沢・平野(1977)によるCa-輝石組成のFeOt-Al₂O₃図はアルカリ-非アルカリ岩系の判定に有効である。この図においてFeOtの増加に伴いAl₂O₃量が増加する場合母岩はアルカリ岩系に、Al₂O₃量が減少あるいはほぼ一定の場合母岩は非アルカリ岩系と判断できる。図10に各サンプルのFeOt-Al₂O₃図を示したが鷺家川サンプル以外は非アルカリ岩の特徴を明瞭に示している。

次に非アルカリ玄武岩と判別された三尾鉍山、五条鉍山、川股鉍山、南日裏、滝の5サンプルについての

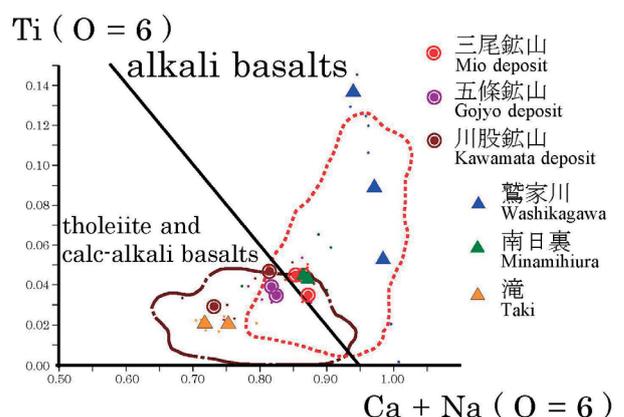


図9 単斜輝石第一判別図
紀伊半島四万十帯北帯玄武岩中の残留単斜輝石

Leterrierの(Ti+Cr)-Ca第二判別図(図11)を作成した。その結果5サンプルとも非造山性ソレアイトの領域にプロットされる。先行研究も参考に判断すれば中央海嶺起源の岩石MORBであると考えられる。一方、三尾鉱山の近傍である鷲家川サンプルはアルカリ玄武岩であり海山起源の玄武岩が付加したと推定される。

6. 野々脇・三尾地域の広域変成作用

6.1 野々脇, 三尾地域の変成分帯

四国東部三波川帯野々脇地域ではIwasaki (1963) が変成分帯をおこなった。野々脇鉱床周辺ではlawsoniteが不安定となりpumpellyiteとactinoliteが共存し, pumpellyite-actinolite亜相に属す。

紀伊半島中央部四万十帯北帯三尾地域では関ほか(1964) が広域変成作用について詳しく論じている。三尾鉱床周辺でも同様にpumpellyiteとactinoliteが共存し, pumpellyite-actinolite亜相に属する。

6.2 野々脇, 三尾地域の変成温度・圧力条件

弱～低度変成岩の変成温度圧力条件を推定するのは, ケイ酸塩鉱物に特徴的なものがないこともあり明確に変成条

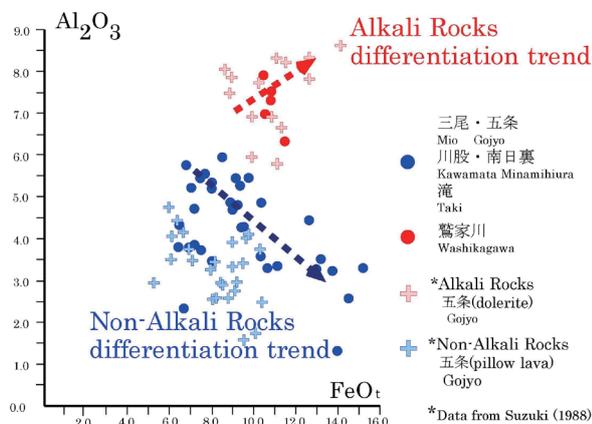


図10 FeOt-Al₂O₃ 図 FeOt=FeO+0.9Fe₂O₃
 紀伊半島四万十帯北帯玄武岩中の残留単斜輝石

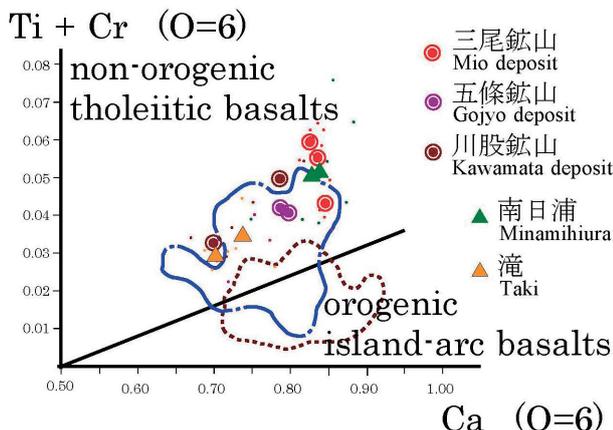


図11 単斜輝石第二判別図
 紀伊半島四万十帯北帯玄武岩中の残留単斜輝石

件を求めるのはむつかしい。よく利用される手法に炭質物の成熟度を求める方法, イライトの結晶度を求める方法, 白雲母の格子定数を利用する白雲母b値法などがある。本研究では, 相対的な圧力条件の推定をおこなう白雲母b値法, 炭質物の成熟度から変成温度を求めるビトリナイト反射法について検討した。

(1) 白雲母b値法

低変成度の高圧変成岩の場合, 白雲母celadonite成分が圧力とともに増加することがわかっている。このceladonite成分の変化は粉末X線法により単位胞のb cell dimension (b値) を決定することで比較的簡便に測定できる。このことを利用しSassi and Scolari (1974) が相対的な地質圧力計として白雲母b値法を提案した。厳密な相平衡に基づくものではなく経験的・統計的な手法であるが, 大量の標本を比較的簡便に処理できる点に特徴がある。白雲母b値は変成圧力が高圧ほど大きくなる。

今回, 野々脇地域と三尾地域の変成圧力を比較するため, 白雲母b値を測定した。測定結果をヒストグラム(図12)にしめしている。両地域はともにpumpellyite-actinolite相の変成作用を被るが, 変成圧力条件は明らかに異なることが読み取れる。三尾地域は野々脇地域よりも相対的に低圧であることがわかる。

(2) ビトリナイト反射率による被熱温度推定

低変成度地域における変成温度推定法は, 変成鉱物共生をもとにする場合, 適切な共生関係の選択, 固溶体関係の熱力学的取り扱い, 流体相の影響, 後退変成作用の影響等, 温度以外の様々なパラメーターの影響を受ける。一方, 温度に対し敏感で連続的に値が変化する点や後退変成作用の影響を受けない性質のあるビトリナイト反射率は, 低変成度地域の変成温度推定に広く利用されてきた。ビトリナイト反射率から最高被熱温度を求める方法は, 化学反応速度モデルをもとにしたSweeney and Burnham (1990) の手法が代表的である。

反射率は, 落射反射顕微鏡で反射光を測光して計測するが, 測定において試料表面を液浸油でおおってから測光する油浸法と, 空气中で直接測定する乾式法があり, 油浸反射率R_oと空气中反射率R_aでそれぞれ区別される。今回は

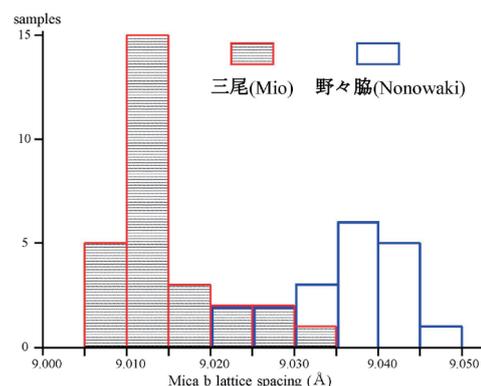


図12 白雲母b値分布 野々脇・三尾地域

西南日本外帯における層状含銅硫化鉄鉱床形成史についての研究
 — 三波川帯野々脇と四万十帯北帯三尾鉱床の地質・変成作用について —

乾式法で空气中反射率Raを測定した。測定の詳細は湯川(2023)にしめた。ビトリナイト反射率の測定結果を図13に示す。

最高被熱温度T(°C)はSweeney and Burnham(1990)の図5から有効被熱時間¹⁾を10Myrとして直接もとめた。測定値の平均値(average)から求めた温度は三波川帯野々脇地域で174~226°C(平均値201°C)、三尾地域の四万十帯北帯では201~216°C(平均値207°C)、三波川帯では200~238°C(平均値218°C)となった。

近年、泥質岩中の炭素質物質についてラマン分光法による変成温度測定(RSCM法)が利用されることが多くなった。本研究の三尾地域においてもShimura et al.(2021)が変成温度を測定している(三尾地域:四万十帯北帯261°C~308°C、三波川帯266°C~357°C)。ビトリナイト温度計の値がRSCM温度計に対し、有意に低くなっている。ビトリナイト温度計とRSCM温度計の不一致は今後の課題として残される。

7. 野々脇・三尾鉱床の形成史

7.1 三波川帯・四万十帯北帯の付加年代

三波川帯変成岩や、四万十帯北帯の弱変成岩では広域変成作用の影響で年代決定に有効な化石を見いだせず堆積・付加年代を直接求めることができなかつた。近年、碎屑性ジルコンによるU-Pb年代の測定が可能となり、陸源堆積物を原岩とする変成岩の堆積・付加年代に制約を加えることが可能となった。火成活動が盛んな白亜紀においては碎屑

性ジルコンの供給が多いためジルコンによる最若クラスター年代が陸源堆積物の堆積年代とみなせることが放散虫化石年代をもとに検証されており(Tokiwa et al., 2017)、最若クラスター年代が付加年代をしめすとされている。

四国東部三波川帯において、野々脇鉱床が属する三縄ユニット下部サブユニット下部(緑泥石帯)の碎屑性ジルコン年代(測定サンプルは野々脇西方40km)が、Nagata et al.(2019)に報告されている。その年代は81Maで、前期白亜紀末から後期白亜紀前半の付加年代をしめす四万十帯北帯谷山ユニットに対応するとした。また、紀伊半島中央三尾鉱床が分布する紀伊半島中央部四万十帯北帯においても、広域変成作用の影響で年代決定に有効な化石が見出せないが、Shimura et al.(2019)が次の碎屑性ジルコンU-Pb年代を報告している。麦谷コンプレックス、Mg1ユニット(109-106Ma)、Mg2ユニット(90-89Ma)である。野々脇と同様に三尾地域も前期白亜紀末(アルビアン期)から後期白亜紀前半(コニアシアン期)の付加年代を示すことになる。各年代は図14にしめた。

7.2 三波川帯・四万十帯北帯の海洋プレート年齢と鉱床生成年代

(1) 三波川帯・四万十帯北帯の海洋プレート年齢

四国東部の四万十帯北帯において、谷山ユニットに対比される手結メランジュで岡村ほか(1980)は玄武岩中に挟在する石灰岩中にバラングアン期(140-133Ma)~オセテリビアン期(133-126Ma)のナノ化石を発見している。チャート層(バラングアン期~セノマニアン期)の下位にある海洋プレートは前期白亜紀最初期(約140Ma)ないしそれより古い年齢と考えられる。一方、四万十帯北帯南部の牟岐ユニットはチャート年代が後期白亜紀のサントニアン期(86-84Ma)~カンパニアン期(84-72Ma)で年

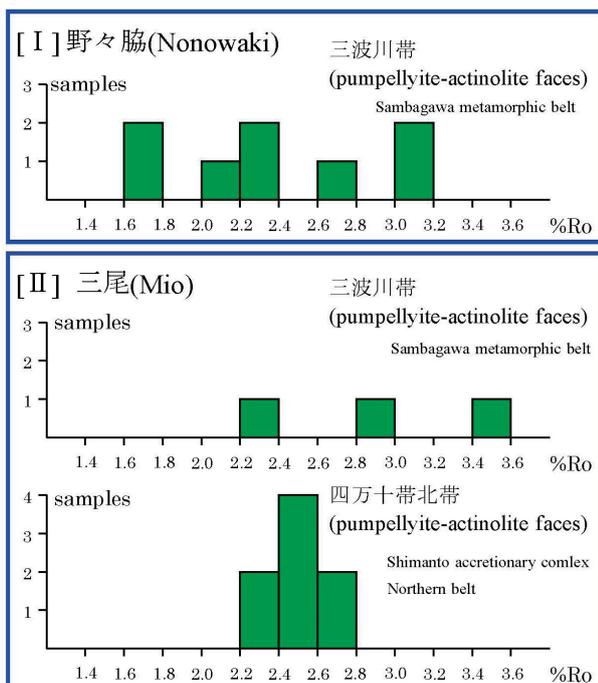


図13 Vitrinite %Ro(average) 値分布

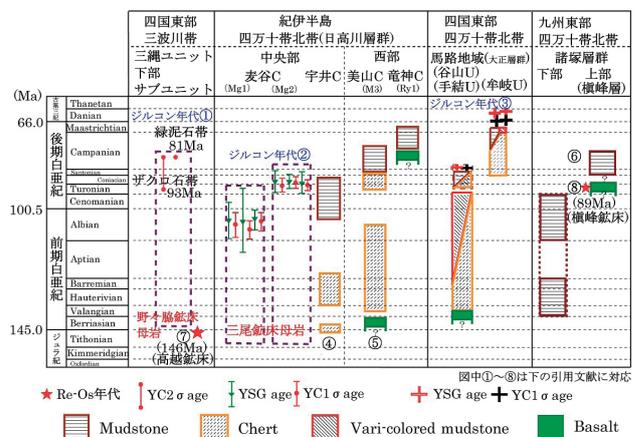


図14 三波川帯、四万十帯北帯ユニット区分対比図
 ① Nagata et al. (2019) ② Shimura et al. (2019) ③ Hara et al. (2017) ④ 大和高峰研究グループ (2012) ⑤ 鈴木・中屋 (2012) ⑥ 寺岡ほか (1990) ⑦ Nozaki et al. (2011) ⑧ Nozaki et al. (2013)

¹⁾ 有効被熱時間: 最高被熱温度から14.4°C低い温度になるまで滞留した時間 (関口・平井, 1980)

代幅は約15Myrと狭く若い海洋プレートが比較的短期間で付加したと考えられる。

紀伊半島四万十帯北帯においても四国東部と同様、美山コンプレックスで玄武岩 (N-MORB) 直上の赤色層状チャートからは前期白亜紀 (133-125Ma) の放散虫年代が報告されている (Kumon, Matsuyama and Musashino, 1997)。つまりチャート層下位にある海洋プレートは前期白亜紀最初期ないしそれより古い年齢と考えられる。ジルコン年代をもとにすれば、三尾鉱床が分布する麦谷コンプレックスは谷山ユニット、美山コンプレックスに対比される可能性が高く、ジュラ紀末から前期白亜紀最初期の海洋プレート年齢が推定できる。一方、四万十帯北帯南部の竜神コンプレックスはチャートを欠く特徴があり、放散虫年代より牟岐ユニットに対比でき、後期白亜紀のより若い海洋プレート年齢が考えられる。

九州東部の四万十帯北帯においても、紀伊半島、四国東部と同様の関係が成立する (図14)。ジュラ紀末から前期白亜紀最初期の海洋プレート年齢 (諸塚層群下部層) と後期白亜紀のより若い海洋プレート年齢 (諸塚層群上部層・槇峰層) である。

(2) 層状含銅硫化鉄鉱床の生成年代

三波川帯と四万十帯北帯の層状含銅硫化鉄鉱床の生成年代としてRe-Os アイソクロン年代が報告されている。三波川帯三縄ユニット主部～上部の層状含銅硫化鉄鉱床 (別子, 白滝, 佐々連, 高越など11 鉱床) の年代が約150Ma (Nozaki et al., 2013), 九州四万十帯北帯南部地域槇峰鉱床は89Ma (Nozaki et al., 2011) と報告されている (図14)。

三波川帯と四万十帯北帯の層状含銅硫化鉄鉱床の生成年代は、海洋プレート年齢およびRe-Os アイソクロン年代をもとに次の2グループに分けることができる。

- ① ジュラ紀末から前期白亜紀最初期に中央海嶺上 (イザナギ-太平洋海嶺) で形成された鉱床 (例, 野々脇鉱床・三尾鉱床)
- ② 後期白亜紀に中央海嶺 (イザナギ-太平洋海嶺) で形成された鉱床 (例, 槇峰鉱床)

8. まとめ

(1) 野々脇鉱床は三波川帯野々脇緑色片岩層 (三縄ユニット下部サブユニット下部), 三尾鉱床は四万十帯北帯麦谷コンプレックスに産出し, それぞれ玄武岩中に胚胎される。野々脇鉱床の黄鉄鉱の粒径は三尾鉱床のものより大きい。また, 三尾鉱床の微細な黄鉄鉱には低変成度鉱床で一般的に観察されるフランボイダル状組織が見られる。三尾鉱床は一部に鉱床生成時の初生的組織を保存していると考えられる。また, 野々脇・三尾鉱床には磁硫鉄鉱が産出する。両鉱床の生成場を考えると磁硫鉄鉱は鉱床生成時の初生的なものではなく, 海溝に付加しメランジュ化した鉱床が続成-変成期に陸源性堆積物中の炭質物により黄鉄鉱か

ら還元されたと考えられる。

(2) 三波川帯野々脇鉱床母岩の緑色片岩および周辺の泥質片岩について主要元素および一部の希土類元素を含む微量元素の全岩化学組成分析を行った。主要酸化物組成, 微量元素およびREE元素組成の特徴から野々脇鉱床の母岩となった玄武岩はN-MORBとしての特徴を有することが明らかになった。

(3) 紀伊半島四万十帯北帯の玄武岩中の残留単斜輝石の化学組成を調査した結果, 鉱床母岩はMORBであることが明らかになった。一方, 今回の調査で一部アルカリ玄武岩が存在することも明らかになった。この岩石は混在岩中の玄武岩岩塊であることから, 付加した海山起源の玄武岩と考えられる。

(4) 野々脇鉱床および三尾鉱床は, ジュラ紀末から前期白亜紀最初期に陸からはなれた中央海嶺上 (イザナギ-太平洋海嶺) で生成され数十Myrかけて移動し付加され, その後, 両鉱床は海洋プレートの沈み込みにとまない深部に持ち込まれた。沈み込み帯深部で被った広域変成作用は, ビトリナイト反射率による温度情報で両鉱床とも200℃程度, 白雲母b値の圧力情報で野々脇鉱床が三尾鉱床よりも相対的に高圧条件であることがわかった。三波川帯野々脇鉱床は四万十帯北帯三尾鉱床より深部に沈み込んだものと推定できる。

(5) 三波川帯と四万十帯北帯の層状含銅硫化鉄鉱床は, ジュラ紀末から前期白亜紀最初期に陸からはなれた中央海嶺上 (イザナギ-太平洋海嶺) で生成されたものと, 後期白亜紀に陸域に比較的近くまで接近した中央海嶺 (イザナギ-太平洋海嶺) で形成された鉱床の2グループに分けることができる。野々脇鉱床・三尾鉱床は前者に, 槇峰鉱床は後者に相当する。

謝辞

放送大学大学院で研究の機会をあたえてくださった大森聡一教授にお礼申し上げます。同じく, 直接の指導をいただいた星野健一客員准教授にも厚く感謝申し上げます。また, 広島大学渡辺洵元教授には長きにわたり研究のご援助をいただきとてもありがたく思っています。お礼申し上げます。

参考文献

- 地質調査総合センター, 2019, 20万分の1日本シームレス地質図V2., 産業技術研究所地質調査総合センター
 Hara, H., Nakamura, Y., Hara, K., Kurihara, T., Mori, H., Iwano, H., Danhara, H., Sakata, S., and Hirata, T., 2017, Detrital zircon multi-chronology, provenance, and low-grade metamorphism of the Cretaceous Shimanto accretionary complex, eastern Shikoku, Southwest Japan: Tectonic evolution in response to igneous activity within a

西南日本外帯における層状含銅硫化鉄鋳床形成史についての研究
 — 三波川帯野々脇と四万十帯北帯三尾鋳床の地質・変成作用について —

- subduction zone. *Island Arc*, e12218.
- Iwasaki, M., 1963, Metamorphic Rocks of the Kotu-Bizan Area, Eastern Shikoku. *Journal of the Faculty of Science, the University of Tokyo, Section 2, Geology, Mineralogy, Geography, Geophysics*, 15, 1-90.
- 金属鋳物探査促進事業団, 1971, 昭和45年度広域調査報告書「吉野川地域」. 1-21.
- Kumon, F., Matuyama, H., and Musashino, M., 1997, An oceanic fragment in the Upper Cretaceous Miyama Formation of the Shimanto Belt, Kii Peninsula, Japan. *Mem. Geol. Soc. Japan*, 48, 100-109.
- Leterrier, J., Maury, R. C., Thonon, P., Girard, D., and Marchal, M., 1982, Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters*, 59, 139-154.
- Meschede, M., 1986, Method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, 56, 207-218.
- Miyashita S., Tsuchiya, N., Ikeda, Y., Sakamoto, I., 1995, Petrology of the Okushiri ridge basalts in the Japan Sea Basin: Arc- and plume-type magma series. *Mem. Geol. Soc. Japan*, 44, 1-21.
- Nagata M, Miyazaki K, Iwano H, et al. , 2019, Timescale of material circulation in subduction zone: U-Pb zircon and K-Ar phengite double-dating of the Sanbagawa metamorphic complex in the Ikeda district, central Shikoku, southwest Japan. *Island Arc*. ;28:e12306. <https://doi.org/10.1111/iar.12306>.
- 中川正男・河井武夫, 1963, 徳島県野々脇鋳床地域の地質と鋳床. 広島大学地学研究報告12, 149-171.
- Nozaki, T., Kato, Y., Suzuki, K., Takaya, Y. and Nakayama, K., 2011, Re-Os ages of Besshi-type massive sulfide deposits associated with in situ basalt as a new age constraint for ridge subduction. *Goldschmidt Conference Abstr., Mineral. Mag.*, 75, 1553-1553
- Nozaki, T., Kato, Y. and Suzuki, K., 2013, Late Jurassic ocean anoxic event evidence from voluminous sulphide deposition and preservation in the Panthalassa. *Sci. Rep.*, 3, 1889, doi: 10.1038/srep01889.
- 岡村 真・平 朝彦・田代正之・甲藤次郎, 1980, 高知県四万十帯中の玄武岩に扶在する"ナンノ石灰岩", 四万十帯の地質学と古生物学—甲藤次郎教授還歴記念論文集一, 215-216
- Rollinson, H., 1993, *Using geochemical data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Cambridge University Press.
- Sassi F. P. and Scolari, A., 1974. The b₀ value of the potassic white micas as a barometric indicator in low-grade metamorphism of pelitic schists. *Contribution to Mineralogy and Petrology* , 45, 143-52.
- 関 陽太郎・大場忠道・森 隆二・栗谷川幸子, 1964, 紀伊半島中央部の三波川変成作用. *岩鋳*, 52, 73-89.
- 関口嘉一・平井明夫, 1980, 有機物熟成度の予測. *石油技術協会誌*, 45, 39-47
- Shimura, Y., Tokiwa, T., Takeuchi, M., Mori, H. and Yamamoto, 2019, Lithological, structural, and chronological relationships between the Sanbagawa Metamorphic Complex and the Cretaceous Shimanto Accretionary Complex on the central Kii Peninsula, SW Japan. *Island Arc*, 28, e12325.
- 志村侑亮・竹内 誠・常盤哲也, 2020, 紀伊半島中央部の四万十帯と三波川帯の地質トラバース. *地質学雑誌*, 126, 383-399 .
- Shimura Y., Tokiwa T., Mori H., Takeuchi M. and Kouketsu, Y., 2021, Deformation characteristics and peak temperatures of the Sanbagawa Metamorphic and Shimanto Accretionary complexes on the central Kii Peninsula, SW Japan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 215, 104791
- Sun, S. -S. and McDonough, W. F., 1989, Magmatism in the Ocean Basins. *Geological Society Special Publication*, 42, 313-345.
- 鈴木博之・中屋志津男, 2012, 紀伊半島における四万十付加体の発達史について—付加体の多様性とその起源—. *地団研専報*, 59, 273-282.
- Suzuki, T., 1988, Geochemistry of metabasalts in the Shimanto Belt. *Modern Geology*, 12, 225-241.
- Sweeney, J. J. and Burnham, A. K., 1990, Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 74, 1559-1570.
- 高沢耕一・平野英雄, 1977, Ca-輝石中のAl₂O₃量と母岩のマグマ系との関係についての考察. *地質学雑誌*, 83, 583-594.
- Tatsumi, Y., Shinjoe, H., Ishizuka, H., William W. Sager, W. and Klaus, A., 1998, Geochemical evidence for a mid-Cretaceous superplume, *Geology*, 26, 151-154.
- 寺岡易司・奥村公男・村田明広・星住英夫, 1990, 佐伯地域の地質. *地域地質研究報告 (5 万分の1 地質図幅)*. 地質調査所, 78p.
- Tokiwa, T., Takeuchi, M., Shimura, Y., Shobu, K., Ota, A., Yamamoto, K. and Mori, H., 2017, Effectiveness for determination of depositional age by detrital zircon U-Pb age in the Cretaceous Shimanto accretionary complex of Japan. *IntechOpen*.
- 大和大峰研究グループ, 2012, 紀伊半島における四万十付加体の発達史について—付加体の多様性とその起源—. *地団研専報*, 59, 15-23.
- 湯川正敏, 2023, 放送大学大学院自然環境プログラム修士論文