

変質帯から見た浅熱水系の広がり

井澤 英 二¹⁾

1975年に始まり2003年3月に終了した北薩・串木野地域の広域調査によって、私たちの浅熱水系理解は大きく前進した。ここでは、金鉱床探査において考慮しなければならない熱水系の広がり的问题を、時間/空間/硫化状態の面から考察する。

1. はじめに

1960年夏、私は卒業研究のため栃木県の足尾銅山に滞在していた。同年春に、国際基督教大学から九州大学工学部に転じておられた浅野五郎先生の示唆で、閃亜鉛鉱の鉄含有率(Kullerud, 1953)と鉱床の生成温度との関連について調べることが目的であった。このときは、足尾銅脈の閃亜鉛鉱が鉄に富むと分かったものの、温度との関係ははっきりしなかった。初めての鉱床研究で、対象が熱水鉱脈と硫化物であったことは、その後の地球を覗く目に大きく影響した。若いときに通過する教育の場の力であり怖さである。

その後、九州で過ごした大学院生時代は、串木野金鉱脈のセレンの産状を調べるテーマに取り組んだ。そのかわり、地熱発電を目指して始められた熱水系調査を手伝うなかで、熱水によって火山岩が変質する現象に興味をひかれた。ニュージーランドやカリフォルニアの地熱開発の進展から、サイエンス誌に「人類は初めて活動中の鉱化流体を手にしたのかも知れない」という米国地質調査所のドン・ホワイトほかによる論文(White *et al.*, 1963)が発表された時期でもあった。鉱化流体が神秘的なものであった時代は終わろうとしていた。

1970年、日本でIMA/IAGOD(国際鉱物学連合と国際鉱床学連合)の合同集会が開催され、論文

で知っていた様々な研究者に直接会う機会を得た。特に、南九州の地質巡検に参加した研究者の印象は鮮明である。実験岩石学のシャイラー、ソ連のV. I. スミルノフ、カナダ地質調査所のロバート・ボイル、米国地質調査所のポール・バートン等である。そのころバートンは、閃亜鉛鉱のFeS量が系の硫化状態によって変化するという実験結果を発表していた(Barton and Toulmin, 1966)。これによって、足尾銅脈の閃亜鉛鉱が鉄に富むのは、熱水環境が低硫化状態であったためであると理解できた。ところで、串木野鉱山の坑内でバートンが投げた質問は思い掛けないものであった。銅脈の露頭はどのような状況かという問いは、合成実験の第一人者のイメージを超えたものだった。当時の私は、坑内の銅脈は良く調べていたが、露頭については答えるだけの観察資料を持たなかった。

2. 北薩広域調査の成果

北薩・串木野地域の広域調査に検討員として加わった1979年当時は、世界的に地熱開発の調査が進み、熱水系の実態が明らかになってきていた。高温地熱系の中心部では、地下の熱水の温度が沸騰点曲線で近似できるということや熱水中のシリカ濃度は石英の溶解度曲線で近似できる(石英温度計)ことである。浅熱水金鉱床の熱水系を古地熱系として理解できそうだという見方が探査家/研究者の間に広がっていた時期であった。

北薩・串木野地域では「総合地化学探査」の名称で、調査の新しい手法として、変質鉱物、微量成分元素、流体包有物を使った熱水系全体像評価のプロジェクトが開始された。フィッシュトラック法や

1) 九州大学名誉教授

キーワード：西霧島地熱系、菱刈、串木野、浅熱水金鉱床、変質帯、硫化状態

K-Ar法による火山岩と鉍石の年代測定が進められたのもこの頃である。各々の測定技術は未熟であったが、熱水系を時間・空間・地球化学的環境の中に位置付ける試みは素晴らしいことであつたと思う(通商産業省資源エネルギー庁, 1981)。最大の弱点は、金の効果的な沈殿にとって沸騰(鉍化流体の気液相分離)が決定的に重要であることを、さほど認識していなかったことであろうか。沸騰の重要性は、菱刈発見後に十分に理解されるようになった。

広域調査の基本データとして火山活動の年代を重視したことによって、南九州が火山活動と金鉍化作用の時空関係を研究する上で理想的な地域であることが分かってきた。まず、火山活動と金鉍化の場が鮮新世から更新世にかけて東進していることが見いだされ(Izawa and Urashima, 1983)、後に浦島・池田(1987)によって確認された。現在では、1970年代と比較して年代測定の技術が向上し、浅熱水金鉍床(菱刈鉍山)-活地熱系(大霧発電所)-活火山(霧島火山)が西から東へと分布する北薩地域の特徴(地質ニュース, 本号表紙)が明らかになった。

3. 熱水系の時間的 / 空間的広がり

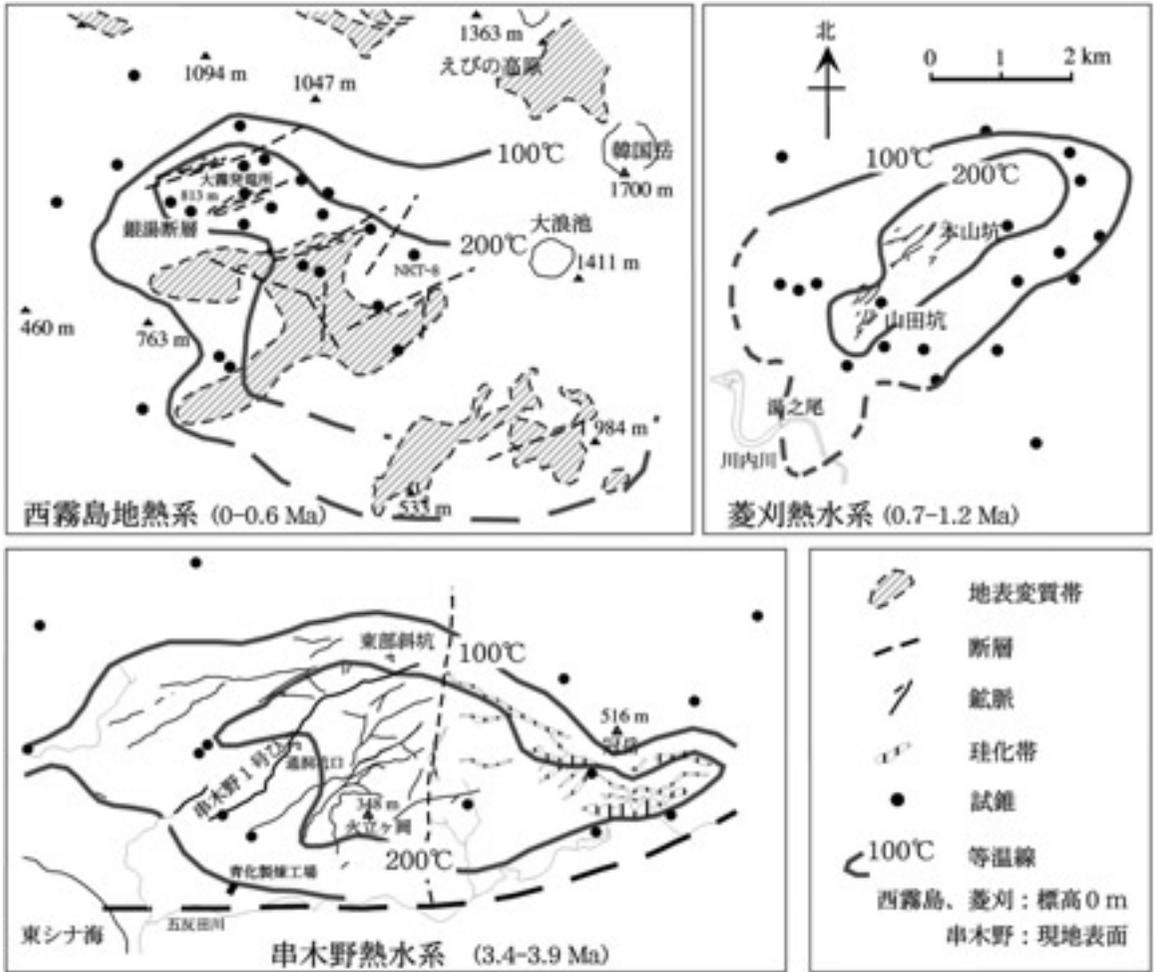
北薩地域について、最近の精度の良い年代データを選んで、火山岩の地質時代別分布と鉍床生成年代を示したものが口絵1である。火山岩の分布と時代区分は、地質調査所発行の50万分の1地質図(今井ほか, 1980)と20万分の1地質図(宇都ほか, 1997)を参考にした。火山岩と鉍床の年代は、最近の測定結果(Watanabe *et al.*, 1994; 永尾ほか, 1999; 通商産業省資源エネルギー庁, 1999, 2000; Izawa and Zeng, 2001; Sekine *et al.*, 2002; 田口, 2004私信)を用いた。1970年代に測定された年代値を再測定によって訂正したものもある。例えば、串木野鉍床の鉍化年代は 4.0 ± 0.3 Maとされていたが、再測定の結果 3.63 ± 0.19 Maと改訂された(Izawa and Zeng, 2001)。

口絵1の年代データは、北薩の火山が西から東へと活動中心を移し(平均移動速度は6-7cm/年)、ある地域に注目すれば、火山の活動開始に遅れること数十万年で熱水系が成熟して金鉍化作用

が始まり、熱水活動の最盛期は30から50万年間継続することを示している。霧島火山の活動は30万年前に始まったといわれるので、大霧地熱系は形成後さほど時間が経っていないと推測される。事実、変質鉍物の分布と実測温度との関係からは、変質帯の削剥がほとんど進んでいないと判断され、非常に若い系であるといえる。

個々の鉍化熱水系の広がり、変質鉍物による研究によって、変質帯と温度の関係が整理され、浅熱水系の温度構造の解明が可能になった。系の周辺から中心に向かって、変質鉍物が認められない未変質岩(あるいは微変質帯)、スメクタイトやカオリン系鉍物は生じているが火山岩中の初生シリカ鉍物のクリストバル石やトリディマイトが残存している低温の変質帯(<100°C: I帯)、スメクタイトと石英の組み合わせからなる変質帯(100-150°C: II帯)、混合層鉍物で特徴付けられる中温変質帯(150-220°C: III帯)、緑泥石とイライトが指示する高温変質帯(>220°C: IV帯)という累帯分布である(Izawa *et al.*, 1990; 茨城・鈴木, 1990)。ここでは、熱水系の広がりとは、ある基準の面について100°C等温線で囲まれた変質帯(II, III, IV帯)の面積とする。

広域調査と鉍山で実施した試錐によって、十分なデータが得られている熱水系がある。その中から串木野と菱刈について取り上げ、比較のため活地熱地域の西霧島地熱系(大霧地熱系)をあわせて示す(第1図)。西霧島地熱系の変質帯や温度測定データは、中川ほか(1985)とIzawa *et al.* (1992)に報告されている。東側は調査データがなく、明瞭ではないが地表の変質帯の分布から境界を推定した。海水面レベル(地表からおよそ800mの深さ)で評価した面積は約33km²である。菱刈では、多くの試錐データがあり、熱水系の範囲がほぼ確定できる。この変質帯の範囲は比抵抗の低い区域(例えば、<25 Ωmの範囲; Izawa *et al.*, 1990)とも一致している。面積は海水面レベル(古地表面からおよそ500mの深さ)で約15km²である。串木野の熱水系は地表調査が密に実施されているため、変質帯の範囲はよく分かっている。南側は五反田川断層によって切られて不確かさは残るが、現在の地表面(古地表面からおよそ450mの深さ; Izawa *et al.*, 1981)では、約30km²ある。これらの



第1図 変質帯の分布によって示される熱水系の広がり。

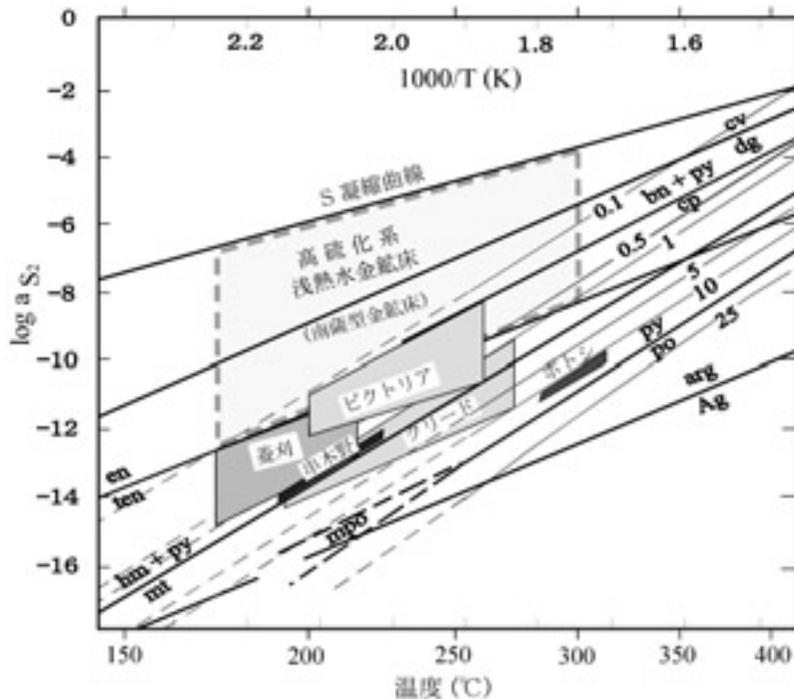
面積は、同様な手法で評価した、鯛生鉱床地域 (24km²) や佐渡の相川地区 (12km²) と大差ない。また、世界各地の鉱床や地熱系の値 (Simpson, 2004 私信), 例えばニュージーランドのワイヒ鉱床 (10km²), テームズ地域 (45km²), ブロードランド・オハーキ地熱系 (12-16km²), アメリカのボディー鉱床 (9km²), フィリピンのトンゴナン地熱系 (55km²) とオーダーにおいては変わらない。

口絵1に示されている北薩の火山活動のもう一つの特徴は、地域北西の長島から東に向かって分布する肥薩火山岩類の特異性である。後期鮮新世の火山前線は、布計、大口地区から南方の山ヶ野地区、大良地区へと北北東-南南西に走っている。この火山弧の背弧側において、火山弧と直行する方向に配列した同時期のマグマ活動の産物をここ

では狭義の肥薩火山岩類と呼ぶことにする。火山弧前線の火山には、布計、大口で代表される熱水系と金鉱化作用が伴われるのに対して、背弧側で、長島から布計の西側まで分布する広大な肥薩火山岩類の地域には、見るべき熱水変質帯が形成されず、金の鉱化作用も認められていない。マグマ熱水系の成立条件を考える上で、注目すべき地域ではないかと思われる。

4. 熱水系の物理化学的条件の広がり

日本と環太平洋地域での浅熱水系金鉱床探査と研究のなかから、硫化状態の重要性の認識が進んだ (ヘデンクウィスト, 1987; Hedenquist *et al.*, 1996)。北薩の金鉱床について、鉱床生成の物理



第2図

浅熱水系鉱床の硫化状態を示す硫黄の活量-温度図。菱刈、串木野、ビクトリアのような金鉱脈の生成環境は赤鉄鉱-黄鉄鉱安定領域にあり、南薩型金鉱床にくらべれば低硫化条件ではあるが、クリードのようなベースメタル鉱脈よりは高硫化条件である。また、ボトシで代表されるSタイプのマグマに伴う錫-銀鉱床はさらに低硫化条件を示している。第1表のデータによって作成。図中の0.1から25までの数字を付した線は閃亜鉛鉱の鉄含有率(FeSモル%)を示す。

cv = コペリン, dg = ダイジュナイト, bn = 斑銅鉱, py = 黄鉄鉱, cp = 黄銅鉱, en = 硫砒銅鉱, ten = テナタイト, hm = 赤鉄鉱, mt = 磁鉄鉱, po = 磁硫鉄鉱, mpo = 単斜磁硫鉄鉱, arg = 輝銀鉱, Ag = 自然銀。

化学的条件を温度と硫化状態(硫黄の活量)で評価したときに、どの程度の広がりがあるか認められるだろうか。熱水の温度は、鉱脈構成鉱物の流体包有物について得られた均質化温度から推定される。熱水はしばしば沸騰状態(気液2相流)にあったと考えられるので、均質化温度のデータの解釈には注意が必要である。低温側に歪んだ均質化温度分布の場合、モードに隣接する低温側の値を沈殿温度と見なすことが妥当と思われる(Loucks, 2000)。これまでの文献に報告されている値は多くの場合、平均値を採用しているので、沸騰を示す試料については、高めの温度が報告されている。深部から上昇してきた熱水の温度は250℃を超えていたと推測されるが、脈石英の沈殿温度としては一般に170-230℃の範囲である。

熱水の硫化状態は、「硫黄の活量-温度図」(Barton and Toulmin, 1966; Vaughan and Craig, 1997)を用いて閃亜鉛鉱の鉄含有率から評価することができる(第2図)。浅熱水系金鉱床を火山中心の環境に生成する高硫化型と火山中腹の地熱系に生成する低硫化型に分類したのはヘデンクウィスト(1987)で、詳細はHedenquist *et al.* (1996)に整理されている。高硫化型浅熱水金鉱床は、コ

ペリンや硫砒銅鉱、自然硫黄で特徴付けられ、南薩型金鉱床はこの型の典型である。閃亜鉛鉱は一般に稀であり、鉄濃度が非常に低い(FeSは<0.1モル%)ことを特徴とする。火山ガスの影響を強く受ける火山中心に生成し、斑岩銅鉱床を伴う可能性が指摘されている。

低硫化型浅熱水金鉱床(Hedenquist *et al.*, 1996)は、高硫化型鉱床より低い硫化状態で生成した鉱床で、火山体の中腹に形成される地熱系と類似の環境であり、鉱化流体は岩石によるバッファーを受けている。黄鉄鉱安定領域で鉄に乏しい閃亜鉛鉱(FeSで0.1-2モル%)を特徴とし、赤鉄鉱の産出も珍しくない環境で、ベースメタル鉱脈型鉱床の環境と比較すればやや高い硫化状態といえる。北薩の金鉱床は第2図に示した菱刈、串木野だけでなく布計、大口を含めて、典型的な低硫化型浅熱水金鉱床(閃亜鉛鉱のFeSは0.1-2モル%)である。

上記の議論で用いた低硫化型とは、浅熱水金鉱床を対象としたときの相対的な硫化状態の高低を表現したものである。ところで、最近、Einaudi *et al.* (2003)は低硫化状態を新たに定義している。それによれば、低硫化状態とは磁硫鉄鉱安定領域を指しているため、閃亜鉛鉱のFeS量は10から20モ

第1表 浅熱水鉱床の閃亜鉛鉱鉄含有率と流体包有物データ。

鉱床	鉱脈	閃亜鉛鉱 (FeSモル%)		流体包有物		文献
		典型例	総範囲	均質化温度 (°C)	NaCl相当塩濃度 (wt%)	
ビクトリア	グループ1-3	0.1-1.7		200-260	0-4.2	Sajona <i>et al.</i> , 2002
菱刈	芳泉1脈	0.1-1.8	0.1-2.6	170-210	0-1.2	Izawa <i>et al.</i> , 2001; Honda, 2003
串木野	1号ひ	1.2-1.6		190-230	0.6-1.1	井沢, 1978; Izawa <i>et al.</i> , 1981
クリード	OH脈	1-2	0.1-20	190-268	4-12	Barton <i>et al.</i> , 1977
ポトシ	ポリパール脈	10.9-14.5		286-315	13.0-13.5	Sugaki <i>et al.</i> , 1985

ル%以上になる(第2図)。

さらに, Sillitoe and Hedenquist (2003) は斑岩銅鉱床と浅熱水鉱床の硫化条件を生成の場のテクトニクスと関連付けることを試み, 低硫化型浅熱水金鉱床を中間硫化型と低硫化型に細分化している。しかし, 個々の鉱床の硫化条件の解析が不足しているために, この分類には混乱がある。例えば, 中間硫化型とされたコロラド州のクリード鉱床群はやや低い硫化状態であり, 閃亜鉛鉱のFeS量は, 典型的には1-2モル%である(第1表, 第2図)。また, 菱刈鉱床は, 閃亜鉛鉱のFeS量が0.1-2モル%と高めの硫化状態を示している。また, 高硫化型に分類されたボリビアのポトシ鉱床については, 銀錫鉱物の沈殿は鉄に富む閃亜鉛鉱を伴い(Sugaki *et al.*, 1985)低い硫化状態を特徴としている。低硫化状態(あるいは中間硫化状態)の用語を用いる際には, 混乱を生じない配慮が必要である。

5. おわりに

本論では, 金鉱床を対象とした北薩広域調査によって明らかになった浅熱水系の規模の問題を紹介した。まず, 熱水系の時間的な広がりについては火山活動の開始から数十万年おくれで熱水系が成立し, 40万年前後の継続期間があることを示した。

空間的な広がりについては, 熱水変質の累帯配列の調査が重要であることを述べ, 面積で数千km²の範囲が探査対象となることを示した。

物理化学的条件の範囲については, 沸騰を伴う200°C前後の温度条件の重要性を指摘し, 硫化状態を閃亜鉛鉱のFeS量で評価したとき, 0.1-2モ

ル%の範囲が北薩の浅熱水金鉱床に特徴的であることを強調した。

1970年代に活発化した浅熱水金鉱床の探査は, 世界的には現在もおお活発に続いている。日本の資源関係者も, 探査の場をますます海外に広げている。海外での探査に当たっては, 国内の広域調査で獲得した知見を継承して新鉱床発見につないでいただきたいと願っている。

引用文献

- Barton, P. B. Jr., Bethke, P. M. and Roedder, E. (1977) : Environment of ore deposition in the Creede mining district, San Juan Mountains, Colorado: Part III. Progress toward interpretation of the chemistry of the ore-forming fluid for the OH vein.. *Econ. Geol.*, 72, 1-249.
- Barton, P. B. Jr. and Toulmin, P. III (1966) : Phase relations involving sphalerite in the Fe-Zn-S system. *Econ. Geol.*, 61, 815-849.
- 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. *Soc. Econ. Geologists Spec. Publication 10*, 285-313.
- ヘデンクウィスト, J. W. (1987) : 環太平洋地域における火山作用に関係した熱水系とそれに伴う金鉱化作用もポテンシャル。 *鉱山地質*, 37, 347-364.
- Hedenquist, J. W., Izawa, E., Arribas, A., and White, N. C. (1996) : Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration. *Resource Geology Special Publication No. 1*, Soc. Resource Geology, 16p.
- Honda, M. (2003) : Paragenesis at Hosen No. 1 vein, Hishikari gold deposit, Kagoshima Prefecture. Unpublished Master Thesis, *Fuc. Eng. Kyushu Univ.* 55 p.
- 茨城謙三・鈴木良一 (1990) : 菱刈鉱山鉱床母岩の熱水変質について。 *鉱山地質* 40, 97-106.
- 今井 功・寺岡易司・小野晃司・松井和典・奥村公男 (1980) : 1:500,000地質図「鹿児島」地質調査所。
- 井沢英二 (1978) : 九州の金銀鉛脈産エレクトラム及び閃亜鉛鉱。文部省科学研究費補助金総合研究 (A) 研究成果報告書 (研究代表者 浦島幸世) No. 234058, 34-36.
- Izawa, E., Etoh, J., Honda, M., Motomura, Y. and Sekine, R. (2001) : Hishikari gold mineralization: A case study of the Hosen No. 1 vein hosted by basement Shimanto sedimentary rocks, southern

- Kyushu, Japan. Soc. Economic Geologist, Guidebook Ser., 34, 21-30.
- Izawa, E., Taguchi, S., Kobayashi, T. and Watanabe, K. (1992) : Gold mineralization in volcano-geothermal areas of Kyushu. 29th IGC Field Trip C33 Guide Book No. 6, Soc. Resource Geology, 143-172.
- Izawa, E. and Urashima, Y. (1983) : Gold-silver Deposits in Southern Kyushu, Japan. Proceedings of the MMIJ/AusIMM Joint Symposium, Sendai, Session JA, 97-111.
- Izawa, E., Urashima, Y., Ibaraki, K., Suzuki, R., Yokoyama, T., Kawasaki, K., Koga, A. and Taguchi, S. (1990) : The Hishikari gold deposit: high-grade epithermal veins in Quaternary volcanics of southern Kyushu, Japan. Jour. Geochemical Exploration, 36, 1-56.
- Izawa, E., Yoshida, T. and Sakai, T. (1981) : Fluid inclusion studies on the gold-silver quartz veins at Kushikino, Kagoshima, Japan. Mining Geology Special Issue, 10, 25-34.
- Izawa, E. and Zeng, N. (2001) : Kushikino gold mineralization in a Pliocene volcanic region, Kyushu, Japan. Soc. Economic Geologists Guidebook Ser., 34, 53-60.
- Kullerud, G. (1953) : The FeS-ZnS system, a geological thermometer. Norsk. Geol. Tidkr., 32, 61-147.
- Loucks, R. R. (2000) : Precise geothermometry on fluidinclusion populations that trapped mixtures of immiscible fluids. American Journal of Science, 300, 23-59.
- 永尾隆志・長谷義隆・長峰 智・角縁 進・阪口和之 (1999) : 不均質なマグマソースから生成された後期中新世～中期更新世の肥薩火山岩類-火山岩の分布と化学組成の時空変化からの証拠-. 岩鉱, 94, 461-481.
- 中川 進・栗山 隆・阪口圭一 (1985) : 西霧島地域の地熱系モデル. 日本地熱学会誌, 7, 329-343.
- Sajona, Izawa, E., Motomura, Y., Imai, A., Sakakibara, H. and Watanabe, K. (2002) : Victoria carbonate-base metal gold deposit and its significance in the Mankayan mineral district, Luzon, Philippines. Resource Geology, 52, 315-328.
- Sekine, R., Izawa, E. and Watanabe, K. (2002) : Timing of fracture formation and duration of mineralization at the Hishikari deposit, southern Kyushu, Japan. Resource Geology, 52, 395-404.
- Sillitoe, R. H. and Hedenquist, J. W. (2003) : Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits. Soc. Econ. Geologists Spec. Publication 10, 315-343.
- Sugaki, A., Ueno, H., Kitakaze, A., Hayashi, K., Kojima, S., Shimada, N., Kusachi, I., Sanjines V., O., Velarde V., O. J., Sanchez, A. C., Frutos J., J. and Alfaro H., G. (1985) : Geological Investigation on Polymetallic Hydrothermal Ore Deposits in Andes Area of Bolivia and Chile. Rept. Grant-in Aid for Scientific Res. Ministry of Educ. Japan, No. 59043007, 438p.
- 通商産業省資源エネルギー庁 (1981) : 昭和55年度広域調査報告書 北薩・串木野地域. 79p.
- 通商産業省資源エネルギー庁 (1999) : 平成10年度広域地質構造調査報告書 北薩・串木野地域. 297p.
- 通商産業省資源エネルギー庁 (2000) : 平成11年度広域地質構造調査報告書 北薩・串木野地域. 104p.
- 浦島幸世・池田富男 (1987) : 布計, 大口, 菱刈, 黒仁田, 花籠各鉱床の水長石のK-Ar年代. 鉱山地質, 37, 205-213.
- 宇都浩三・阪口圭一・寺岡易司・奥村公男・駒澤正夫 (1997) : 1:200,000地質図「鹿児島」. 地質調査所.
- Vaughan, D. J. and Craig, J. R. (1997) : Sulfide ore mineral stabilities, morphologies, and intergrowth textures. In Barnes, H. L. (ed.) Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. 3rd ed. 367-434.
- Watanabe, K., Maeda, T. and Izawa, E. (1994) : Fission track ages of Plio-Pleistocene volcanic rocks in the Okuchi region, southern Kyushu, Japan. Geoth. Res. Report Kyushu Univ., No. 3, 98-110.
- White, D. E., Anderson, E. T. and Grubbs, D. K. (1963) : Geothermal brine well: Mile-deep drill hole may tap ore-bearing magmatic water and rocks undergoing metamorphism. Science, 139, 919-922.

IZAWA Eiji (2004) : The size and extent of hydrothermal systems evaluated by alteration zoning.

< 受付 : 2004年5月31日 >