

総 合 討 論

露木利貞（座長 鹿児島大学理学部）進行役を勤めさせていただき、座長をやらせていただきます。

標題は、古地熱系とそれから活地熱系、ということなんでございますけれども、昔われわれが熱水系とっておったのが、最近、地熱という問題が出てまいりまして、今のように、地熱系とか、そういう言葉が出ているんだらうと思います。

私たち、地熱系という場合に、実際に流体が動いているようなそういうものを、これをアクティブな地熱系というふうに定義づけているんで、流体が全く動いていない死んでしまったものを、はたして地熱系といえるかどうかという問題がございますけれども、ここでは、そういった今日ずっとお話がございました意味も、金だとかそういうものを沈殿しているような、あるいは、金鉱床ができているような、そういうものまで含めることにします。一番先に木村さんがやっておられましたような、トラフの中の高温地帯、あるいは、熱流量が大きいとか、そういったことが最初分かりましたのが、これは紅海の中でなかったかと思うのですが、それからあといろいろなことで海底の中で高温な場所があるということが分かってまいりました。最初の木村さんの話でございましたように、アルビン号あたりがガラパゴス島の沖合、あるいは、メキシコの沖合あたりで、そういったことが実際にあり、その海水、あるいは、その堆積物、あるいは、沈殿物、そういったものが、次第に分析されてきて、そしていろんな重金属がそこで沈殿しているということが分かってきているわけです。そういう一つの海底の地熱系というものがありまして、さきほど討論の中に出ておりましたように、日本の黒鉱銅鉛亜鉛の鉱床のようなものが、これも海底のそういった古地熱系の産物だらうといわれています。

ひるがえりまして、活地熱系の方におきましては、主として地熱というエネルギーという立場から捉えられて、調査されてきております。それが最近になりまして、たとえば、菱刈の鉱山、金の鉱山、それから、さきほど田口さんがお話になりました金が沈殿しているいろいろなスケールや沈殿物、そういったものが分かるようになりまして、温泉あるいは噴気と、金鉱床の成因というものが、いろいろ問題になってきているわけですね。たしかに金というのは、私たちは昔はこれは浅熱水鉱床とあって、地熱という言葉を使うしないで、熱水という言葉を使ってまいりました。日本ですと、土肥だとか蓮台寺だとかそういった伊豆におきまして、金とそれから地熱あるいは温泉なり、そういったものが関係があるということは、前から知られておったわけですが、そういった問題が最近捉えられるようになってきました。それでさきほど、最初、浦島さんの方から話が出ましたように、金鉱床というものが、地熱あるいは熱水と関係しているといわれました。それから最近では、fossil hydrothermal system だとか paleo-hydrothermal system だとか、そういう言葉がさかんに使われますが、fossil geothermal という言葉はおそらく使うのが初めてではないかと思うんです。そういう意味で熱水と地熱というものが取り上げら

れている、そういうことです。

今日は非常に広い範囲にわたりまして、南太平洋各地域、とくに、この潜り込みのところにおきましては、いろいろな噴気活動、あるいは、火山活動、そういったところに行ける鉱床というものをいろいろ話していただいたわけですが、これからそういったものをなにかまとめながら、あるいは、なにか一つでもお互いにかみあうところを見付けながら、ということで、一つ、討論をしていただきたいと思うわけですが。

まず、木村さんがお話しくださった沖繩トラフだとか、あるいは、南の方ニューージーランドのことについて、あるいは、そのあとのことでもけっこうでございますけれども、何か話題を出していただけたら、どなたからでもけっこうでございますけれども、20分ぐらいの間で締め切りしたいと思います、お願いしたいと思います。

木村政昭 沖繩トラフで金が沈殿しているとすれば、そういう場合ですね、basalt のリッジと rhyolite, dacite の山のこの辺とどちらが可能性がありますか。

小林哲夫 それと関連するんですけどね、さきほど田口さんが、金が地殻の浅い graywacke のところから溶かし出されて地表に集まるといいますよね。沖繩トラフのどういうところに金銀が出るかということと関係するんですけど、金というのは、graywacke みたいな堆積岩のところが一番濃集しやすいのか、たとえば、ほかの vein-type の鉱床がありますね、それらが全部地殻からの溶かし出しとすると、たとえば、graywacke だと選択的に金銀鉱床を濃集するということがあるのかどうか、その辺をあわせておききたい。

田口幸洋 よくいわれている graywacke の層というのは、たとえば、日本では四万十とかいわれているそれは何かというと、その中にある black shale、あれに非常に重金属というものが濃集している。それに水が回って少しずつ金属成分だけ溶かしていけばいいわけで、溶かしたあとの石をみても全然変わっていない程度の抽出があればいいというふうに、一般的には考えられています。具体的に受けた前後の石を分析してもある程度の金は含まれているのではないかと考えます。

井沢英二 結局、金の量はどの岩石でも似たようなものなんですね、安山岩を分析してみても、堆積岩を分析しても、あまり変わらないんです。たしかに、泥岩に高いのがあっても部分的で、全体としてみるとやっぱりせいぜい 2~3ppb あればまあ金が多いかなというぐらいのものです。さっきの black shale がなぜいいかというと、多分、有機物といっしょになって存在しているのではないかとこの夢があるんですね。そういうものは熱水が回って来ると、わりあい金が溶けやすいのではないかと、これは一種の夢なんです。ですから、そういう black shale が厚く存在する上に、金鉱床ができるだろうということです。たださっき私がいきましたようにそういうものが全くないフィジーであるとかソロモン群島とか、そういうところでも金鉱床ができている、ですから、それは必要条件ではないだろう。

それから、さきほどの木村さんの流紋岩のところではどうか。田口さんの絵を見ますと、山そ

のものの上では出てこないですね。やっぱり、山のふもとのところに出てくるわけです。この場合も流紋岩の方が確率は高いんじゃないかというのが私の感想なんですけれど。

田口 陸上の場合、海底と本質的に違うことが一つだけあるんです。何処かといいますと、陸上だといわゆる水理系の影響を受けて、地熱徴候が地表近く何処まで来るか、あるいは横に来たり、どちらを選ぶかは水理系によるのですが、必ずしも真上に来るとは限らないんですが、海の中に入りますと、全部水で埋まっている。温度の高い所の真上しか対流系を作らない。それを外れたところでは熱水がないというふうに考えられて、やはり熱い所の下にほんのちょっとでも熱水があるのではないかと思います。ある海底での地表での地熱徴候のありかたというのはこのような差があると思います。

木村 温度が高いところがあればその上の方がいいということですね。

田口 それはよくわからないけれど。

井沢 これはむしろ林さんの方がいいんだけれども、basalt というのは一過性で、安定した熱水系を作らないのではないかとわたしも考えます。ですから、むしろ andesite の頭や dacite ぐらいをやるほうがいんでないか、

露木 林さんなにか。

林 正雄 今私が調べた範囲では、古地熱系ということは多分活地熱系がかつてあったということで、そういう点に関して地熱系の熱ということを少し調べてみたんですけど、そうしますと、やはり acidic な rhyolite か dacite の方が寿命が少なくとも一けた以上長くなっておる。具体的に申しますと、現在地熱発電が可能な非常に活発な地熱系というのは、dacite とか rhyolite とか、酸性の火山活動の所では、20～30万年よりも新しい、というオーダーであるのに対して、basalt とか塩基性の火山活動が活発な所では、それよりも一けたないしは二けた早く冷却する。具体的には、数万年あるいは数千年程度で冷却してしまうというデータがございます。そういうことも関連があると思います。

木村 Rhyolite の base の上は比較的熱的な寿命が長く、少なくとも数十万年くらい。Basalt の周辺ではどうして熱が少ないのか。

林 それはほぼ同じ規模の火山活動としましては rhyolite の方が長持ちすることがあるのかもしれない。

小林 さきほど田口さんがですね、ニュージーランドのタウポの地熱とものと南のトンガリロナショナルパーク付近の火山とで、地熱徴候の現れかたが変わるというようなことをいいましたけれども、今いろんな方が述べていますけれども、流紋岩の方がね、熱源として長期に熱を供給するということは、たとえば、トンガリロみみたいな active な火山活動の所では、マグマ溜まりというのは恒常的に存在していない。その時々マグマを地表に出すだけであって、地下には存在していない。ところが、rhyolite みたいになると、ある程度固くなると、それが地表に出ないで、地殻の中で動けなくなって止まってしまう。そういう状態を見ているのではないかと、というふう

に、僕は考えているんですけど、その辺はどうですか。

田口 そういふことがあると思います。とくに、basalticになると、非常にマグマの上がって来るのは通路は限られていて小さい。たとえば霧島でも、若い飯盛山の vent の近くでも、熱水変質の影響は少ない。熱水対流系の作りかたはやはり rhyolite の方が非常に効率がよい。非常に浅い所までマグマが上がって来るわけですから、やはり熱水対流も作りやすい。ただ、andesite の火山の下に無いかというと、今はやはり見えない。

小林 見えないだけと考えますか。

田口 噴気孔みたいなのが斜面にあるんですけど、かなり下で分離された噴気が上がって来ている。量的には少ないかもしれませんが、今の金銀鉱床というのは、rhyolite もありますけれども、やはり基本的には andesite にあると思うんです。その近くに小さい rhyolite もあるけれども。だから、andesite 地域にでも、やはり私は下にはある程度はあるんじゃないかと思いません。

小林 それが流紋岩みたいなもので、ある程度動きがとれなくなったら深成岩体になるのではないかと考えているんですがどうですか。要するに andesite よりももう少し分化したような普通という深成岩体ですね、深成岩体でも大半は andesite の組成ですから、それほど細かく議論することはないかもしれませんが、要するに、深成岩体がかなり浅い所にあると考えなければいけないんですね。

田口 そうですね。

露木 温泉あたりにしましても、basalt 地域の温泉というのは非常に少ないし、やはり、acidic rock のところに量的に多い。あるいは、いま林さんがいったように、少なくとも、一けたあるいは二けたオーダー平均寿命が長い。そういったことが一つあるんじゃないか。それから、上がってきてすぐに変質とかなんとかでシーリングするような形ですから、上がってこないということがあり得るかもしれない、そういったことを考えているんですが。

福重 私は鉱床とかはあまりよく知らないんですけども、先程の写真で鉱石のなかの珪石の中に金を含んでいる、それから串木野など必ず回りに石英だとか方解石だとかいっぱいありますね。また siliceous sinter の話がありました。熱水は siliceous な溶液で、一緒にシリカが沈殿しているという感じにみえるんですけども、沈殿したときはまだ無定形のシリカだと思うんですけど、鉱床になりますと石英になりますね。あまり大きな影響を受けていないと感じられますけれども、石英にまでどうしてなるのかということ、もう一つ、熱水の中でのシリカの溶解度、どのくらいの濃さで溶け込んでいるものか、そういうことも教えていただきたい。私はシリカの量だとか、あるいはシリカのそういった仕事をやっているものから。

井沢 やはり説明不足だったと反省したんですけども、熱水から金鉱床ができるという話ばかりして、あまりシリカのことを強調しなかった、金とシリカが一緒にあるということだけを話したので、悪かったなと思ったんですけど、熱水というのは水の起源は大部分は多分地表の水だ

ろう、それが地下に回って暖められて、300°Cぐらいになる。そうしますと、周りの岩石とある程度平衡に達するわけですが、その場合に、シリカに関しては、石英に対して飽和状態になる。ですから、そういう高温でのシリカの溶解度というのは、300°Cくらいですと、700 ppmぐらいのシリカが溶け込んでいる。そういうものが地表に上がってきますと、温度はどんどん下がります。300°Cのお湯が上がってきても、地表になると100°C以上にはなれないのですから、その過程で温度は下がる。そのときに、シリカの溶解度はどんどん下がる。200°Cになると、シリカの溶解度はもう250 ppmぐらいになる。そういうことは、溶解度の差だけ珪酸分を周りの壁に、割れ目にくっつけていくわけですね。そのときに、金の溶解度は、若干下がりますから、少しずつ沈殿する。ただそのときには、大量の金は落ちない。金が落ちるには、温度低下のほかに、田口さんがおっしゃったような、沸騰現象が起こるといような大きな変化、それから地表の水と混合して、いきなり酸化される、そういう変化がおきます。そういうものが加わって、はじめて金が落ちます。その二つ、温度低下とそのほかを区別して、説明しなければいけなかったと思います。

福重 非晶質のシリカが金鉱床ではどうして少ないのでしょうか。

井沢 250°Cでシリカが沈殿していくときには、安定なのは石英の形ですね。非晶質で落ちるのは、100°C以下と考えてもいいわけですね。

福重 いきなり石英ですね。

井沢 いきなり石英と考えてもいいわけです。希薄溶液です。条件によってはもう少し別な phase、たとえば、クリストバライトと呼ばれるもの、いろんな形でいったん沈殿して、再結晶する。それだったら考えられる。いずれにしても、シリカ分がどんな形であっても、長く250°Cにさらされますと、再結晶して石英に変わってしまいます。ほとんど最終的には石英となります。温度が低いと非晶質シリカとして沈殿し、そのまま残ります。温度によって変わるということです。

露木 あとなにかございませんでしょうか。

前田 工学部の前田と申しますが、田口さんにお尋ねいたします。ニュージーランドの地熱発電所で、使用済みの熱水を自然界に放流しているという、今までそうしていたということですか。日本の阿蘇の発電所なんかでは、100%還元井に還元しているわけですが、その理由はいくつかあると思いますが、1つはAsの濃度がかかなり高いということですが、ニュージーランドの熱水中のAsの濃度はどの程度でのもののでしょうか。

田口 多分、大岳あたりと同じで3 ppmくらいでないでしょうか。ただ、向こうはいくら放流しても、流れているワイライ川の水が大変大きいものですから、薄まってしまって、ほとんど影響がない。だけど、最近、その還元しないと取り出すばかりで、だんだん枯渇してしまうということですから、ある程度熱水を戻して、それを再循環させるということを考えて試しています。日本では、温泉から出てくるAsは、問題にたいしてならないんですけども、人工的に取り出したAsは非常に厳しい規制を受けるものですから、日本ではまず還元ですね。

露木 あとどなたか。

林 さきほど井沢先生にお聞きしたことと関係があるわけですけど、火山があれば必ず地熱系がある、地熱系があれば金鉱床があるという、そういうふうには単純にはいかないのではないかと、という考えがあるわけです。まあ、今、私が考えるだけで、それは講演のときにどなたかがお話しになりましたけれど、地熱系を形成するには、cap rock、帽岩というものが必要なかどうか、そういうこともいま非常に重要でございます。それからたとえば、桜島というのは非常に若い火山であるのに、どうも熱水系というのがあまり顕著ではない。海底にありそうというのは確かめられていない。その辺の、火山が生成して地熱系ができるという生成条件、それから地熱系があっても金鉱床が生成するとは限らない。その辺を、なんとか皆様のご意見をまとめるのも重要ではないかと思えます。

木村 錦江湾の海底で、熱水が300°C越すのがあるんですね。

林 だから、そういうスポット的なものはたしかに得られています、たとえば地熱発電ができるような、ないしは、金鉱床を形成するような大きな地熱系、そういうものがあるかどうかというのは、どうなんでしょうかね。私よく知りませんが。

露木 浦島さん、なにか。

浦島 1番むつかしいのが回ってきました。金鉱床ができあがるというのはやっぱり供給する材料がなければですね、それは場所によって問題が違いますけれども、そういう供給するような材料のあるところであればもちろん金鉱床はできない。シリカだけですとたいていありますから、金を含まない石英脈とか、金を含まないsinterだとかは非常にたくさんあるだろう。それから今度は供給だけでなく、入れ物が必要だと思うんですね。ですから基盤だけですと入れ物としては不十分です。入れ物としてはいろいろありますけれども、適当な構造がなければ金銀鉱脈はできないのではないかと、適当な構造をもち、適当な岩質をもった入れ物が、適当な地表からの位置にないと、というようなことです。全部が全部、熱水系と金鉱床が一对一で対応するものではないと思えます。

露木 今の霧島を全部剥ぎとった状態というものを考えた場合に、そういうことがほんとうにあるのか。

浦島 私はそう聞かれた場合には、あの、採れるようなものはないだろうとお話ししないとですね、その気になる人が現れると困りますから。

林 この問題で、田口先生は霧島の下を掘れば金鉱床があると、浦島先生はないといわれるんですね。それから私は桜島近辺に地熱系に対応するようなものがあるのかないのか、なければどういう理由か、いま僕は答えられないと思うんですけど、そういう方向に研究が進んでいけばいいと思えます。今日答えられるものではないと思えます。

井沢 今の問題に関して、地形というのは大事だと思うんですね。地形条件というのはどういうふうに変化しているか、現在のactiveなものを十分調べていくと、逆に今度は、古地熱系の場合

も、地形の特徴を復元していくと金鉱床が分かるのではないかと、というように私は現在思っています。

露木 中川さん、あの、霧島でずいぶん方々を御覧になって、そういう、金でもありそうな所はありますか。

中川 私も田口さんの方から大分以前にニュージーランドの例など聞いて、金が非常に夢のあるものでございますので、それが地熱を探すよりよっぽどいいんですね。コアとそれからあの付近にけい化した地域がございますので、くまなく採取しまして、分析したんですけれども、どうも今のところ、まだ見付かっていないようです。

露木 ありがとうございます。

田口 それともう1つあるんですけど、金ができるか、鉛垂鉛ができやすいか、というのは、1つには、Cl 濃度が非常に関係してまして、Cl 濃度が高い所では、鉛垂鉛がクロロコンプレックスとして非常に濃集するということ、ですから、多分桜島とか指宿の山川とかああいう所では、海水が多分地熱系に入り込んでいるので、できるならああいう所に鉛垂鉛です。東北の黒鉱の東側にやはり vein-type が発達していますけれども、やはり鉛垂鉛のタイプが多いというのは、黒鉱鉱床なんかができただ中に、やはりわりと早い時期に塩水に富んだ鉱化流体がふぞんしていたから、多分ああいう地域では、鉛垂鉛としての脈鉱床になっているのではないかと、また、そういうClの低いところには、金銀ができやすいところなんです。Clが高い所は鉛垂鉛の方が鉱床になってしまっている。そういうわけです。

露木 井沢さん、おっしゃるように、そういう地形的なもので、流体がどんどん下から出てきて、というような大きな循環系みたいなのがなければですね、火山があっても、循環する流体がないといった状態では、下のものは上がってこない。たとえば、ニュージーランドあたりでも、あれだけの時間、何千トンというような非常に大量のものが循環することによって、たとえば、まあ、ppb ぐらいの単位で下に存在しているものも、非常に長時間、1000年とか2000年という、あるいは、それよりももう少し長い時間において、この地表まで、次々と到達することによって、何かできるんじゃないかというような雑然とした、こんなことを言えば叱られるかもしれませんが、そういう感じを、私は今日の話聞きながら思ったことでございますけれども。

このあと1つぐらいなにか話題がございましたら、このさい。

今日は、木村さんから始まりまして、中川さんには現在の日本の技術開発といったようなものを含めまして、お話ししましたし、それから、田口さん、あるいは、井沢さんには、私たちが常日頃考えていながら、なかなかそういう数字をあげて聞くことがなかったんでございますけれども、とくに、最近のppb オーダーのものじゃなくて%オーダーで濃集しているというようなそういう話を聞いて、ppb オーダーでもできるんじゃないかと思っていたんですけれども、そういう濃縮の機構のようなものを聞かせていただきました。金銀の問題というのは、最近のホットな問題でございますし、それから、海溝の潜り込みの問題、そういった所の熱流量の問題、それか

ら、どういうところに火山ができるかといったようなそういう大きな問題まで入ってくれば、とても時間的にこんなところで全部討論できるはずもございません。

鹿児島大学におきましては、そういったセンターができて、なんとか南の方の海域におきまして、いろいろ共通の話題をたどりながら、少しでも、研究の成果をあげて、大きなコミュニケーションを進めていこうということで、今日はそういったものを聞いたわけでございます。講師の先生方、それから、討論に参加していただきました方々、本当にありがとうございました。まずい司会でしたが、一応はそれぞれの立場で、いろいろお感じになったんじゃないかと思えます。そういうものを手掛かりに、今後さらにお互いに連絡しながら、進めていくことができれば、今日これを開いた意義もあろうかと思えます。

時間もまいりましたので、総合討論の方はこの程度にさせていただきます。講師の皆様に対しまして、拍手をもって1つお礼を。

(文責 編者)