

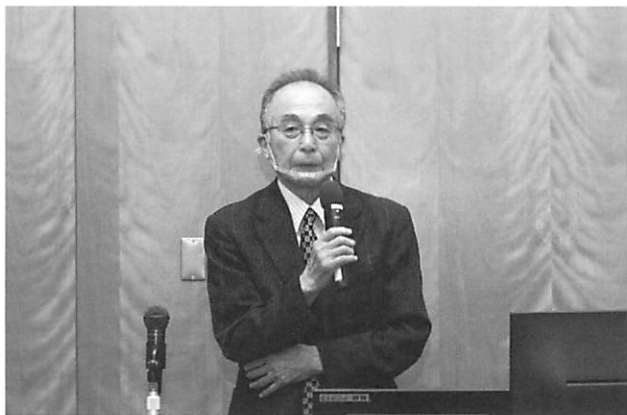
温泉と自然

京都大学

名誉教授 由佐 悠紀

由佐悠紀先生は、地球物理の研究者で、温泉資源の保護と適正利用に関する多数の業績をおもちです。1966年から京都大学にお勤めになり、2004年まで大分県別府市にある京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設で研究を行われておられました。現在は、日本温泉科学会理事、大分県温泉調査研究会会長、別府市文化財保護審議会委員を務められています（編集部）。

1 地球の創生



講演中の由佐悠紀先生

非常に丁寧なご紹介をいただき、面映ゆい気がしています。研究を始めて50年以上経っているので、ご覧の通りかなり年をとっています。今日は、「温泉と自然」というテーマでお話しさせていただきます。この温泉学概論は、いろんな分野の先生方がお話しのですが、自然科学系は私一人のようなので、温泉とはどういうものか自然科学的な立場からご紹介したいと思います。

最初に別府市がこの6月に公開しました「Beppu The Onsen Journey」というインバウンドのお客さんを対象とした別府温泉の紹介の動

画がありますのでご覧いただきたいと思います。その後、解説を含めて温泉の自然科学的な特徴をご紹介したいと思います。

(YouTube省略：サイトは<https://www.youtube.com/watch?v=VzbwKqLSvVw>)

動画を見ていただきました。この動画の特に自然科学的な部分は私が監修しました。地球がどうできたかということ、それから地球の温度が高い状態になっていたことが紹介されていましたが、そのあたりのところからお話ししたいと思います。

地球の内部の温度が高いということは昔から想像されてきました。火山活動がある、地熱地帯（地獄）がある、温泉が湧いている、鉱山の坑道で深く掘ると熱くなってくるなど、地球の内部は熱いのだろうと思わせる場所があったからです。

しかし科学的な観点からそういうことが研究や議論の対象になったのは案外新しいのです。19世紀の半ば1860年代頃で、日本は明治維新で江戸時代から明治時代が変わっていく頃です。イギリスにケルビン卿（本名ウィリアム・トムソン）という大物理学者がいました。絶対零度という言葉聞いたことがあると思います。摂氏で言うと



「Beppu The Onsen Journey」

-273度です。温度には上限はないのだけれども一番低い温度というのはあるというようなこと絶対温度という概念をうちたてた人です。

その頃、我々の住んでいる地球は一体何かということが自然科学界で話題になったらしくて、1862年にケルビン卿はある数理モデルを作りました。地球はできた時に溶融状態にあり、ドロドロに溶けていたが、それが冷却されて現在のようになったというモデルです。そして、地球の年齢は2000万年～4億年と結論づけました。

最初、地球は溶融していたという仮定をおいたのですが、なぜそのような仮定をしたのかという根拠はありませんでした。それが後世の疑問となったのです。そして、長くても4億年を超えないだろうという数値についても、疑問視されました。地球上にはいろんな岩石がありますが、その一つに堆積岩があります。土粒子が溜まって圧力がかかり岩石になった。これができるまでに大変な時間がかかるわけです。地質学者は、4億年程度で厚い堆積岩の地層ができるはずがない、と反論したのです。

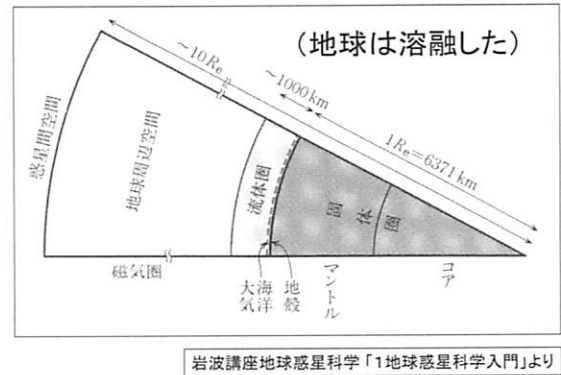
生物学者からも疑問が呈されました。チャールズ・ダーウィンが進化論を発表しましたが、原始生物から現在の高等生物への進化が4億年程度でできるはずがないというわけです。

このような議論が起こる中、ダーウィンは、「まだ我々が知らないことがこの世の中にはあるのではないか。その効果があるのではないか」とサジェッションしました。そして、20～30年後の19世紀末から20世紀初頭に「放射能・放射性元素」が発見されました。ラジウムを発見したキュリー夫妻の名前をご存じだろうと思います。そして、放射壊変に伴って発熱することが発見されました。

この発見により、ケルビン卿の「地球は一方的に冷えてきた」という仮定が成り立たなくなったのです。地球は、発熱していることがわかったからです。

一方、日本では明治維新以後に、多くの外国人研究者がやってきました。その中に自然科学者もいました。その人たちが驚いたのは、東京に住んでいると地震がよく起こるということでした。欧

図1 地球の大局構造：層構造（1930年前後）



米では地震はまれでした。それで、次第に地震の研究が進んできました。その結果、一つの非常に重要な成果が生まれました。それは、地球の内部はいくつかの領域に分かれていて、地球の中心には核と呼ばれる領域、その外側にはマントルという領域、地球の表面には地殻と呼ばれる領域があり、それらが層になっているという発見でした。

層にわかれているということは物質が分かれているということですから、そのような現象が起こりやすい状況にならなくてはいけない。ということは、地球はいったん溶けたことがあり、重力の作用によって、地球の中心にはおそらく鉄類など密度の大きいものが集まり、外側の部分には軽い岩石、さらに外側には大気がある、というような層構造のモデルができました（図1）。

これより少し後になりますが、太陽を中心とした惑星系はどのようにしてできたのが議論になりました。現在では、「太陽系は、宇宙空間に漂うガスやダスト（低温の固体微粒子）から誕生した」と考えられています。

宇宙空間は温度が低い（3ケルビン〔K〕：-270℃）中で、万有引力で集まったガスやダストが惑星になる、つまり低温のものが集まり惑星になるというのです。

ですが、地震の研究で、惑星はドロドロに溶けていた、つまり高温になっていたということがわかりました。そこで、この現象をどう説明していくかが問題となりました。

まず、先述した放射壊変による発熱によるものではないかと考えられました。その計算も行われました。地球上にある放射壊変する物質の量を見積もり、それが何年経ったら地球が溶けるぐらい

の温度になり得るかということを見積もりました。そうすると3Kの物質だったとしても、80億年くらいかれば地球は完全に溶けるということがわかりました。これで「わかった」ということになりそうだったのですが、そう簡単にはいきませんでした。

この頃、放射性物質を使って岩石の年齢を測定することが可能になり、一番古い岩石は、30~40億年くらい前の堆積岩ということがわかりました。堆積岩は、陸地ができて、壊れて、微粒子になり、海に入り、沈殿し、固まってできるわけです。すると30億年くらい前に陸地がすでにあったということになります。すると、数十億年くらいでは間に合わない。それで、放射性物質の壊変によるという推論は、可能性はあるけども、実際的にはなさそうだということになりました。

さて、それでどうするかが問題です。46億年前に、それ以前から宇宙空間の隕石類が集まってだんだんと成長して、現在ほどの大きさの地球になりました。その後も、周囲にまだ隕石がたくさんあるので、それがぶつかります。隕石がもつ位置エネルギーが地球の中心にむかって動く運動エネルギーに変わり、それがぶつかるとエネルギーは熱に転換し、温度が上昇します。

先ほどの「Beppu The Onsen Journey」の動画では、その量を見積もりました。ぶつかるときの速度は秒速10~20kmです。それでどれくらい岩石が溶けるかを計算した結果、1グラムの隕石が衝突すると数10グラムの岩石が溶けることがわかりました。これくらい大きなエネルギーを持っているわけです。そのエネルギーによって地球はドロドロに溶けたという考え方が、現在は受け入れられるようになっています。

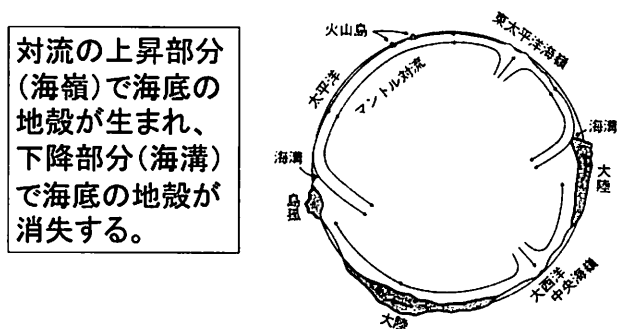
つまり、今と同じ大きさになった創生時（46億年前）の地球は宇宙空間物質の衝突によって融解し、その後、地球は放射性壊変による発熱により温められながら、冷え続けてきた、というふうに結論づけられました。19世紀中頃にケルビン卿がつくったモデルは、放射壊変による発熱が考えられていなかったのですが、最初にドロドロだったということの背景には、衝突のエネルギーがあったのです。

はじめに地球全体が溶けて、次第に層構造になっていくと、それまでの地球と違った様々な現象が展開することになります。最も基本的なものは、マンテル対流です。地球の中心は鉄類がある核で、その外がマンテルになっています。ここは岩石ですが、高温ですから柔らかい。すると、地球の中心は温度が高く、外側は低いので、対流がおこります。物理的には、軽いものが下にあり、重いものが上にあるという不安定な状態とみることが出来ます。不安定だと、動き出そうとします。岩石ですが、温度が高いので柔らかくて、鉛みたいにゆっくりと動きます。それがマンテル対流です。

そして、そのマンテル対流の上に地殻があります。私達が住んでいる陸地を含むかたまりがマンテルの動きによって動きます（図2）。そのかたまりをプレート（板）と呼びますが、その板が、あっちにいたり、こっちにいたりして、ぶつかったり、離れたりします。その板の境界部分で、いろんな現象が起こります。地震、火山活動、熱水活動（温泉）などです。

こうして、マンテル対流が起こり、地殻を動かし、様々な現象が生じるという一つのストーリーが組み立てられるようになりました。先ほどの動画の前半部分がここを描いていたわけです。

図2 マンテル対流



2 温泉とは何か？

そのような自然の中の一つの現象が、温泉です。温泉の定義ですが、もともとはごく自然で簡単なもので、「地中から出てくる温かい水」というものです。しかし、温泉を学問の対象としてとらえていこうとすると、次のようになります。

「その土地の普通の地下水の温度より高温の水が地中から地表に出て来る現象」。普通の地下水の温度は、時や場所によって異なりますが、基本的にはその土地の年平均気温よりも1~4℃高いのが、その土地の普通の地下水の温度になります。では、その年平均気温はどうやって決まるのか。それは太陽エネルギーでできあがっています。

太陽エネルギーでできた年平均気温よりも高温というわけですから、他のエネルギーで温まっているのです。その他のエネルギーとは何かといえ、地球ができたときのエネルギー及び放射性物質の発熱です。

基本となる年平均気温ですが、1981~2010年の平均では、一番北の稚内が6.8℃、青森が10.4℃、東京は16.3℃、大阪が17.0℃、別府あたりで16.0℃、沖縄が23.1℃です。各地で年平均気温が異なっていますので、各地域の温泉の温度が異なるということになります。

各地で温泉の温度が違うのは温泉行政では困ります。そこで、全体をとりまとめられるような温度を基準として法律で定めましょう、ということになりました。自然現象だけれども、法律が関わって定められているのは温泉ぐらいのもので、非常に珍しいです。

では、どこを基準に温度を定めるのかということになるわけですが、温度が高いところを基準にしておけば日本全国をカバーできるだろうということで、日本では25℃と決めました。

これまでは「温度」という点から温泉の定義についてお話ししたのですが、もう一つ別に「薬理効果や医療効果」がある水という点で説明をしたいと思います。病気の時に飲むと良い、傷口をその水であらうと傷が治るとい水があります。これは、水に含まれている成分の作用です。それは昔から知られていて、「鉱泉」あるいは「鉱泉水」(ミネラルウォーター)と呼ばれてきました。

これも特殊な水です。先程は「温度の特殊性」ということでしたが、「成分の特殊性」があるのです。これも研究の対象でした。法律としても、成分的な基準があったほうがマネジメントしやすいという要請もありました。それで、「普通の水と、物理的・化学的に性質の異なる天然の水

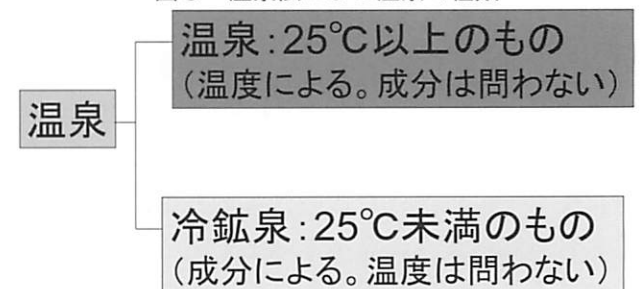
が、地中から地表に出てくる現象」というように温泉が定義されました。温度のほうは「物理的」という言葉を使い、成分のほうは「化学的」という言葉を使うわけです。日本では法律で定めていますが、日本だけではなく、世界の国々も温泉の定義をしています。

日本では昭和23年に「温泉法」が定められ、第2条で「この法律で『温泉』とは、地中から湧き出す温水、鉱水及び水蒸気その他のガス(炭化水素を主成分とする天然ガスを除く。)で、別表に掲げる温度又は物質を有するものをいう」と定められました。

別表には、次のように定められています。一つは、「温度は摂氏25℃以上」です。もう一つは、化学的な成分が、「溶存物質(ガス性のものを除く)が1000mg以上(温泉1kg中)・遊離炭酸CO₂250mg以上(温泉1kg中)のいずれか一つ」です。このスライドでは、成分はこの二つしか挙げていませんが、ほかにもあります。ちなみに、温度と成分は、「and」ではなく「or」で、どちらか一方を満たしていれば温泉となります。

このように、法律的には、温泉は二つに定義されました。一つ目は、温度が「25℃以上のもの(温度による。成分は問わない)」です。二つ目は温度が「冷鉱泉・25度未満のもの(成分による。温度は問わない)」です(図3)。

図3 温泉法による温泉の種類



3 温泉の研究

そうすると、温泉が自然科学的に成立する要件は、次のようになります。一つ目は「熱源」です。まず温度が高くないといけない。二つ目は、その熱源にあたためられ温泉となる媒質である「水」です。三つ目は、その水が出てくる「水(流体)

の通路」が必要です。四つ目は「物質源(副次的)」です。つまり、温泉が自然科学的に成立するには、熱・水・通路、それに副次的に物質源が必要です。そして、温泉の研究は、この四つについて研究していくこととなります。

まず、一つ目の「熱源」です。その土地の地下水の温度は、その土地の気温によって決まります。基準は年平均気温で、これに関わるエネルギーは太陽エネルギーです。温泉には、この太陽エネルギーとは別のエネルギー(熱源)が必要です。それが、地球ができたときの熱と放射性物質の熱です。

次に、二つ目の「水」です。基準となるのは普通の地下水です。そして、その地下水は天水(降水、循環水)と思われます。ただし、科学的には、天水であるかどうかは、自明ではありません。三つ目の「水(流体)の通路」です。これは先述したとおり、地下水が地中から地表に出てくるためには通路がなくてはなりません。最後に、四つ目の「物質源」です。広義の定義により、化学的な性質を規定する物質源が付け加わったものです。副次的とはいえ、温泉科学の重要な対象です。

以上四つの要件を少し詳しくみてみます。まず、水源についてです。天水であろうと思われませんが、もしかすると別の水があるのではないか。あるとすれば、どれくらいあるのか。なければ、天水であることの証拠はどうやってみつけるか。別の水というのは、岩漿水(岩漿はマグマ。それにとまなう水)だろうか。などといったことです。

地球ができて以来、初めて現れた水を考えてみます。地球創生時、エネルギーは地球外からもたらされました。そして、水も小惑星などがもたらしました。そうしないと、つじつまがあいません。その時にもたらされた水が、そのままの状態であるかどうかを調べようとしてきました。

最初の研究は、19世紀半ばに、ブンゼンがアイスランドの温泉について行いました。その水が天水だろうか、それとも岩漿水が入っているだろうかという研究が行われました。結論は、天水でした。

その後、20世紀中頃から、重水を用いた研究を経て、水分子の水素・酸素安定同位体比を用いた

研究手法が発展しました。水素には重い水素と軽い水素があります。酸素にも重い酸素と軽い酸素があります。その組成を調べた結果、世界中の温泉水は「天水起源」で説明可能ということではほとんど決着がつかしました。

日本の温泉水(地熱水)も、大部分が天水であることがわかります。そして数は少ないのですが、マグマにくっついている水蒸気もあります。これを調べてみますと、海水が変質していることがわかりました。それで現在は、温泉水の主な源は天水であるという結論になりました。

それから、水(流体)の通路ですが、これは別府がそうであるように、断層運動があつて、割れ目が通つて、そこを通過して温泉が湧き上がってくるということです。それだけではなく、天水が温泉の源ですから、天水は地下に浸透しなければならないわけです。わき上がる通路は、天水がしみこむ通路にもなっています。地下にマグマがあり、蒸気が上がってきていますが、その通路でなくてもならないわけです。

通路が重要であるという証拠を例で示したいと思います。一つは「富士山」、もう一つは「鶴見岳」です。「富士がみえるところには温泉はない」と言われます。富士山は優勢な温泉系のない活火山です。降水量の77%が、山麓で湧水として流出し、残りの23%が蒸発するということがわかっています。深いところに行って温泉になる水が無い。

そうすると、富士山はどうみることができるのか。まず、山(土地)があまり破壊されていない、単純な美しい山で、地下に割れ目がないであろうと考えられます。割れ目がないので天水が深くまでしみこむことができない。地下には熱源があるのに、温泉には成りにくいのだろうと解釈されます。

他方、鶴見岳は優勢な温泉系(別府温泉)のある活火山です。降水量の53%が土地の浅い層で流出する地下水になり、16%が深層地下水である温泉になり、残りは蒸発します。鶴見岳は山の形が富士山と比べて複雑な壊れた形をしています。山がよく破壊されていて、水の通路が発達し、天水が深部の熱源と出会い、温泉になるわけです。

全国の多くの温泉地にある山は、鶴見岳タイプです。箱根は温泉地として有名です。箱根の地形図をみると、カルデラになっていて、山がよく壊れています。九州の中部の地形図を見ると、いたるところに割れ目があり、土地が壊れてしまっているかんじです。

最後に熱源と物質源についてです。もともとの熱源というのは、隕石などがぶつかってできたエネルギーです。物質源も隕石などです。世界の温泉分布をみてみますと、一番多いのは太平洋をめぐる地域、次いでインドネシアから中国の雲南省を通り、チベットを通り、南ヨーロッパに至るところです。そして活火山分布をみると、温泉分布とだいたい重なります。これらを見ると次のように言えます。「活火山があるところには温泉がある。しかし、温泉があるところに活火山があるとは限らない」ということですね。活火山は熱源となりうるので、温泉はだいたいある。でも、割れ目がなければ温泉は発達していないのです。しかし、温泉があるところに活火山があるとはかぎりません。地球内部の熱で温められた温泉があります。つまり、温泉は「火山性温泉（熱源：マグマ溜まり）」と「非火山性温泉（熱源：地球内部の一般的な熱流）」の二つに大別されます。

別府温泉もふくめて、日本の温泉はほとんど火山性温泉です。1960年頃の日本の温泉分布をみると、太平洋側には温泉が少ないことがわかります。大分県も南部には温泉が少ないです。宮崎県も太平洋側にはない。これには理由があります。日本には活火山を含む第四紀火山（約260万年前よりも新しい時代に活動をした、また、これからも活動する可能性のある火山）がありますが、分布をみてみると、これも太平洋側にはないのです。温泉の分布は、火山の分布に重なるのです。活火山があり、その火山より大陸寄りに温泉は分布しているというのが、日本の温泉の特徴です。

なぜ、そのようになっているのかといえば、温泉がわくところには、マグマ溜まりがあるということです。その深さは、活火山の地下約10キロメートル程度です。温度は、溶融状態の温度は、1000℃程度です。

火山性温泉のでき方、加熱の仕方というのはどうなっているのか。その一つはマグマ溜まりから地層を通しての熱伝導、もう一つはマグマ溜まりからの高温流体（マグマ発散物・火山ガス）の混入です。マグマ溜まりから火山ガスがでます。主成分は水蒸気です。水蒸気が上がってきて、浸透してきた水に混入する。そうすると温度がぐっとあがります。

マグマ溜まりから上がってくる火山ガスは、直接には採取できませんが、その名残のようなものをときどき採取できます。主成分は水蒸気です。他にいくらか多めに入っているのは、塩化水素、二酸化硫黄、硫化水素、二酸化炭素の4つです。塩化水素はよく水に溶けます。マグマ溜まりから火山ガスが来て天水と出会い、塩酸が生じます。二酸化硫黄も水に溶けやすい。これが天水に出会うと硫酸が生じます。つまり、強い酸性の水ができます。そうすると強い酸が周囲の岩石を溶かして、岩石の成分が溶け出すのです。ナトリウムやカリウムが溶け出す。そうすると、あたかもNaCl（食塩）の溶液のような塩化物泉ができる。硫化水素も酸化されて水に溶けると強い酸性の水になります。CO₂は水に溶けると炭酸水になります。

④ 10の泉質とその原因

泉質は医療効果の観点から、10種類に分けられています。単純温泉、塩化物泉、炭酸水素塩泉、硫酸塩泉、二酸化炭素泉、含鉄泉、酸性泉、含よう素泉、硫黄泉、放射能泉です。このうち、塩化物泉、炭酸水素塩泉、硫酸塩泉、二酸化炭素泉、酸性泉、硫黄泉は火山ガスによるものと説明することができます。

別府では、マグマ溜まりから火山ガスが上がってきて、天水と出会います。生じた熱水が上昇してくると、圧力が低下して、沸騰して熱湯と蒸気に分かれます。熱湯は、ずっと流れていって、鉄輪温泉あたりに達します。

蒸気のほうにはH₂Sが入って、これがどこで上がってくるかということ、明礬温泉や塚原温泉です。その中のH₂Sは、新しい地下水と混じり、

含まれている酸素で酸化されて硫酸が生じます。そのような酸性の水は鍋山や明礬、鉄輪辺りを流れています。

さらに、流れて行って、天水がしみ込みながら、海岸部の温泉となります。別府は、こうした温泉の経路がよく観察できます。塚原・明礬・鉄輪、それから照波園や亀川などの泉質がどうやってできるのか、先程から話してきた泉質形成のモデルで説明できます。このモデルは、いろんな温泉についても説明が可能で、霧島や東北の大きな温泉地についても説明できます。

繰り返しになりますが、火山性温泉では火山ガスと天水が出会うということが重要です。そうすると火山性温泉の熱源も物質源も同根であるといえます。具体的には、火山ガス（マグマ発散物）ということになります。

先述しました火山分布図ですが、ここには「火山前線」があります。火山はこの線上に分布しています。この火山前線はどのようにできているのか。世界中の火山孤の分布をみますと、各火山孤の側に線がありますが、これは「海溝」です。つまり、海溝と火山はペアなのです。日本も日本海溝、南海トラフ、琉球海溝と並行して火山が分布しています。

フィリピン海プレートは、マントル対流に引っ張られて、九州にぶつかって沈み込んでいる。沈み込んでいるプレートの温度は低いのです。でも、冷たい海底部分が沈み込んでいる上に、熱い火山がある。これは非常に不思議です。実は、プレートが沈み込むときに、海水も一緒に引きずり込んでいる。水があると、岩石は溶けやすいのです。つまり、引き込んだ海水は温泉に関係していると考えられます。温泉にはいろんな化学成分が含まれていますが、その成分のよってきたところは何かということですね。温泉の成分はわかっていて、でもそれぞれの源は何か、ということがわからなかったのです。ですが、この20～30年のうちに、モデルができつつある。つまり、海水または海水に含まれている成分が、温泉成分に関わっているのではないかとということです。

日本列島の下に太平洋プレートやフィリピン海プレートが沈み込んでいく。地下約100キロメー

トルの深さに達すると、温度はいくらか上昇して1000℃くらいになります。そうすると、岩石が溶けてマグマになる。マグマになったときに、海水の成分が移る。それでガスを含んだマグマが上がってきてマグマ溜まりに溜まり、噴火に至る。

海底の堆積物には、サンゴや魚の骨や貝ガラなども含まれています。これらが地中で熱せられてCO₂を生成すると考えられます。これが別府温泉のCO₂です。明礬なのは長湯温泉です。あそこは炭酸泉で有名ですが、CO₂の70%は海由来のおそらく珊瑚礁（炭酸カルシウム）からきているでしょう。

海水にはNaClがありますが、これからHClが生成するのではないか。このように海底の物質や海水が巻き込まれ、マグマに溶け込み、温泉となって再び地表に出てくると考えられます。

フィリピン海プレートが南海トラフで沈み込み、別府の地下100キロメートル下でマグマとなり、マグマ溜まりを形成し、上昇して来る火山ガスが天水と出会って別府の温泉ができている。沈み込み帯は、火山・温泉を介した海域・陸域間の物質循環系であります。

南海トラフというと、地震・津波が気になる場所です。それに対応しなければならぬと言われていますが、九州に火山・温泉が存在するためには、南海トラフでフィリピン海プレートが沈み込まなければなりません。地震・津波と火山・温泉はペアであるということです。温泉を楽しむのもよいと思いますが、このように温泉がどのようにできるのかについて考えてみるのも意義あることではないかと思えます。