

ソルト・サイエンス・シンポジウム 2019 「海水・塩と温泉」開催について

去る10月17日(木)に、品川区立総合区民会館「きゅりあん」1階小ホール(東京都品川区)において、「ソルト・サイエンス・シンポジウム 2019」を開催しました。

当財団では2003年(平成15年)から、塩に関する科学的な情報を提供する本シンポジウムを毎年開催しております。第17回目となる今年は「海水・塩と温泉」をテーマに、第一線でご活躍の3名の先生方にご講演いただきました。

当日は、塩事業関係者、一般企業・大学関係者、一般の方々など、約100名にご参加いただきました。

冒頭挨拶にて、当財団の墳崎敏之理事長が財団の事業概要とこれまでのシンポジウムの実施概要について紹介しました。続いて、木村修一シンポジウム企画委員長(東北大学名誉教授)から今回の企画コンセプトと講演3題についてのご紹介があり、その後講演に移りました。各講演の概要は以下の通りです。



会場入口



オープニング



墳崎敏之理事長挨拶



木村修一シンポジウム企画委員長挨拶

1. 「高塩分温泉の成り立ち」

京都大学大学院教授 大沢信二先生

巨大地震の原因や火山の成因とも関係の深い、沈み込む海洋プレートから脱水した深部起源水に由来する「高塩分温泉の成り立ち」についてご講演いただきました。具体的には、温泉水の起源を明らかにする研究方法から、高塩分温泉の水質例、その成因メカニズムなどについて、図表を交えて分かりやすくご紹介いただきました。

大分県にある深部起源水由来の温泉では、温泉水が地表まで到達するのに約 1,300 万年かかっているという壮大なスケールの講演でした。



2. 「海底温泉で形成される海底熱水鉱床」

海洋研究開発機構海底資源センター企画調整統括 木川栄一先生

日本の新たな鉱物資源として注目されている「海底温泉で形成される海底熱水鉱床」についてご講演いただきました。具体的には、海底熱水鉱床の生成メカニズムと分布、海底の調査から採鉱・揚鉱までの流れを多くの写真やビデオを交えて分かりやすくご紹介いただきました。講演の中では、海底熱水鉱床形成においては、火山ガスから生成される酸に加えて、海水中の塩が金属を溶けやすくしているという、大自然における塩の役割に関する興味深いお話もありました。



3. 「塩化物泉(食塩泉)の医学的効果」

国際医療福祉大学大学院教授 前田 眞治先生

日本に数多く存在する「塩化物泉(食塩泉)の医学的効果」についてご講演いただきました。具体的には、塩化物泉の定義から塩化物泉の温熱効果に伴う人体への様々な効果とそのメカニズムをはじめとして、細菌が繁殖しづらくなる効果、心身のリラックス効果、さらには、飲泉の効果など、塩化物泉の様々な効果について実験データを交えて分かりやすくご紹介いただきました。戦艦大和の海水風呂や入浴剤などの話も交え、日常の健康増進にも役立つ講演でした。



各講演に対しては様々な質問があり、改めて今回の講演に対する関心の高さが伺えました。

本稿は当日の写真や質疑応答を盛り込んだシンポジウム 2019 の記事となっています。講演要旨は、開催時に発行しておりますので、それを抄録として掲載し、質疑応答とつながるように編集しました。なお、本シンポジウムの講演要旨については当 Web サイトのシンポジウムのページで公開しております。



コーヒープレークの模様

講演－1

高塩分温泉の成り立ち

大沢 信二

京都大学大学院教授

座長：齋藤 恭一

千葉大学名誉教授



大沢信二 先生

1. はじめに

温泉とは、元々自然湧出のものを指していたが、井戸を掘ることができるようになってからは、地中から取り出される温かい地下水も温泉と呼ぶようになった。どのくらいの深さから取り出されているかと言うと、温泉として利用する目的で掘られた井戸で私が知りうる最も深いものは2,714mであり、近頃は、1,000m くらいは普通に掘るようになっている。地球の半径 637 万 8,000m に比べると取るに足らない深さだが、たくさんの深い温泉井が日本全国あちこちで掘られるようになったおかげで、それまであまり目にふれることがなかった塩分の濃い温泉水を普通に見ることができるようになった。

そのような高塩分の温泉水は、以前から知られる塩気のある自然湧出の鉱泉水にたどれることが多いのであるが、どれも海水と同じような化学組成を示し、古い時代の海水に由来すると見なされて、「化石海水型温泉」という風と呼ばれていた。その水質は海水と同じように、主としてナトリウム(Na)イオンと塩化物(Cl)イオンからなることが一目瞭然であり、塩分濃度の違いは成分の薄い地下水が混ざること、副成分の違いは地下滞留中の化学反応で生じていると考えられてきた。

本講演では、そのような「化石海水型温泉」に対し、環境同位体(D/H、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 、 ^{129}I など)を使った地球化学の手法によって水や成分の由来を見直した私たちの研究を、物語風に紹介しようと思う。

2. 研究のきっかけ

1960年代以降、非火山地域において深い井戸掘削によって温泉の開発が盛んに行われ、「深層熱水型温泉」と呼ばれ、一時活発に研究された。その起源については長らく、「地下深くに埋没した地層中の淡水性あるいは海水由来の間隙水が地温により加熱されたものである」とする考えが広く浸透していた。九州の東部、北東に瀬戸内海を望む大分平野にも、そのような深層熱水型温泉が多く分布しており、私はそれらに対して、温泉成分のホウ素と塩素の比(B/Cl)を用いて起源に関する予察的研究を行い(大沢、1996)、続いて、熱水に溶存する炭酸の炭素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$)に着目した研究を行った(大沢、2001)。その結果、非火山地域である大分平野の温泉水の溶存炭酸にはマグマ起源の二酸化炭素(CO_2)と同様な CO_2 が様々な割合で混入しており、特にNa-Cl· HCO_3 型に分類される高塩分の温泉水については、その炭酸成分のほとんどが土壌有機物とは異なる起源の地球深部に由来する CO_2 であることが明らかとなった。これは、深層熱水の起源を堆積層中の化石海水に求める従来の解釈とはかけ離れたものであり、化石海水型温泉の起源や成因について考え直す契機となった。

その結果を受け、大分平野の深層熱水型温泉水に対して水素・酸素同位体比の測定を行い、溶存炭酸のほとんどが深部起源を示す温泉水の中に、有馬温泉とその

周辺地域で見出されている「有馬型熱水」(例えば、松葉谷、2009)に酷似する異常な水素・酸素同位体組成を示す極めて塩分濃度の高い温泉水を発見した(網田ほか、2005)。そして、私たちは、地質学者が想像しているように(例えば、巽、1995; 西村、2000)、火山前線より海溝側の非火山地域(地学では「前弧域」と言う)の地下深部で沈み込む海洋プレートの脱水が起こっていて、その脱水流体(「スラブ脱水流体」と呼ぶ)に由来する深部熱水が地表にまで上昇してきていて温泉の起源水になっているのではないかと予想した。

以上が高塩分温泉の成り立ちを見直す研究を始める直接のきっかけとなった出来事である。その後、私は有志を募って非公式な研究チーム「熱水流体研究グループ」をつくり、京都大学地球熱学研究施設のホームグラウンドである別府温泉を離れ、南九州の宮崎から四国、近畿地方まで西南日本の大調査旅行に出かけることにした。

その際、調査の大方針としたのは、「地表近くの地下水や起源の異なる浅層の温泉水の混入影響が少ないと期待されるできるだけ深く掘削された温泉井を探す」であり、温泉分析書や旅行誌などを手掛かりに調査計画を立てた。実際の調査で入手した代表的な高塩分温泉水の分析データを見ると海水以上の塩分濃度を示す高塩分温泉水が地下に“眠っている”ことを、実感いただけるものと思う。

3. スラブ脱水流体にたどれる温泉を探し求める調査研究

宮崎平野の温泉(大沢ほか、2010)

高塩分温泉には以前から考えられてきたような海水に直接由来するものもあるはずで、スラブ脱水流体に関連する高塩分温泉の探索には、海水由来の温泉水がどのような水質や同位体的特徴を示すかを比較のために是非知っておく必要がある。情報収集を既存論文に頼る方法もあるが、そもそも「高塩分温泉≒化石海水型温泉」という考えが主流であった時代に行われた研究から知りたい情報を手に入れることは難しいと考え、私たちは、まず、前弧域(火山前線より海溝側の非火山地域)に形成された堆積岩地域である宮崎平野の温泉を実際に調査して情報を集めることにした。

宮崎平野の温泉の多くは井戸掘削によって得られたもので、深度は最大で2,000 mあまりにも達し、表層に分布する宮崎層群の下位に潜在する四万十累層群にまで達していることが確認されているものもある。宮崎層群の分布域には水溶性天然ガス田が発達しており、一ツ瀬川流域を中心とする地域(佐土原地区)では現在でも天然ガスの生産が行われている。天然ガスには塩水が付随することは良く知られていることで、私たちはその付随塩水が化石海水型温泉であると目星をつけ、佐土原地区を含む平野全域から温泉水試料を採取した。

宮崎平野の温泉井から流出する温泉水の化学・同位体データに現れる系統的な関係の解釈や地下熱水温度の推定結果から、2種類の温泉起源流体の存在を認めた。一つは堆積物間隙から絞り出される海水で、もう一つはおよそ130°Cにおいて粘土鉱物(スメクタイト)の層間から排出される水である。前者が目星をつけていた化石海水型温泉の起源水であり、後者は当初存在を予想していなかったタイプの温泉起源水で、塩分濃度は低く、ホウ素(B)に富み、熱分解性メタンを含んでいるのが特徴である。これらは、海成の堆積物が地下に埋没して堆積岩を形成して行く過程(「続成過程」と呼ぶ)で堆積層から逐次排出される水に対応すると考えることができる。

四国・近畿地方の温泉(網田ほか、2014; 網田、2016)

喜ばしい予想外の成果もあったが、宮崎平野の温泉の調査研究によって、堆積物の間隙や堆積層の空隙に閉じ込められ水質や同位体組成に若干の変化が起こった海水、つまり典型的な化石海水型温泉を検分することができ、スラブ脱水流体にたどれる温泉の本格的な探索の準備ができた。その一方で、「目的のスラブ脱水流体にたどれる温泉は、どのようなテクトニック・セッティングに見出されやすいだろうか?」という小さいが重要な研究課題に取り組んだ。

構造地質学的に島弧地殻をマントルとの境界まで断裂させている可能性のある、西南日本を東は中部地方から西は大分平野まで縦断する大断層である「中央構造線(Median Tectonic Line)」に目を付け、そのような大きな断裂であればマントル内を上昇してきたスラブ脱水流体を地表近くまで誘導することが可能であろうと考え、

それを温泉探索の際の指針に盛り込むことにした。温泉分析書や旅行誌に記載の泉質欄を手掛かりに炭酸成分を豊富に含んだ食塩 (Na-Cl) 型水質の高塩分温鉱泉をリストアップし、そのリストをもとに四国地方と紀伊半島西部地域の中央構造線沿い、ならびに中央構造線に準じる地質構造線である^{ぶつぞう}仏像構造線沿いに存在する温泉地を選び出し現地調査の候補地とした。

調査した温泉から採取してきた温泉水ならびに網田ほか(2005)で研究対象とした大分平野の温泉水の同位体組成 (δD と $\delta^{18}O$) のうち岩石-水相互作用で値が変動しにくい水素同位体比 (δD) を取り出し、塩分濃度との関係を見ると、海水より極めて低い水素同位体比を示す紀伊半島西部の中央構造線沿いの温泉 W と大分平野の温泉 O1 と O2 については海水を上回る高い塩分濃度をもつ温泉起原水が存在することを示唆しており、その他の同位体データ (ヘリウム ($^3He/^4He$), 炭素 ($\delta^{13}C$), ヨウ素 (^{129}I)) の解析ならびに総合的な考察からスラブ脱水流体に起源を求めることができると結論した。なお、四国地方の温泉は、宮崎平野の温泉の起原水のような水質・同位体的性質を持っており、海洋プレートの沈み込みの初期段階で海底堆積物の続成作用によって発生するスラブ脱水流体も存在するのではないかと考えている。

有馬地域の温泉 (大沢ほか、2015; 大沢、2018)

スラブ脱水流体由来温泉の起原水のことを、多くの研究者が研究対象としている有馬温泉 (金泉) の名の一部を冠して「有馬型熱水」と呼ぶようになった。しかし、有馬温泉の直下の地下深部には地震観測によるプレートの沈み込みが確認されないことから、温泉水のスラブ脱水流体由来についてこの温泉の調査で検証を行っても説得力に欠けると私たちは考えて、調査研究対象から外していた。しかし、ある機会に有馬温泉とその周辺地域のいくつかの温泉を調査することができたので、採取した試料からそれまでと同様の水質・同位体データを入手し、得られたデータをそれまでに培ってきた方法で解析したところ、有馬型熱水と水質はよく似ている (炭酸成分に富んだ Na-Cl 型高塩分水) が、水の同位体組成 (δD - $\delta^{18}O$) やヘリウム (He) 同位体組成など同位体的な性質が全く異なる温泉水が、有馬温泉から 20 km も離れていない兵庫県三木市の吉川に流出していることを発見した。私た

ちは、それまでの研究を総括することによって、スラブが沈み込んで温度・圧力が増大するとともに、堆積物間隙海水の絞り出し、粘土鉱物層間の圧搾、変成脱水分解によって、それぞれ Na-Cl 型高塩分水、低塩分・Na-Cl、 $HCO_3 \sim Na-HCO_3$ 型低塩分水、Na-Cl、 HCO_3 型高塩分水 (前2者が続成脱水流体、最後者が変成脱水流体) が漸次放出されると考えている。しかし、すべての脱水流体が排水されずに蓄積されたとすると、各脱水流体の量比によっては蓄積によって生成する流体の水質は個々のスラブ脱水流体のそれとは違ったものになりうるということ、微量元素濃度を用いた混合計算のシミュレーションで示すことに成功し、吉川で発見した一見風変わりな高塩分泉は逐次放出される脱水流体が排水されずに蓄積した結果生じたものであるとして説明した。そして、逐次脱水してくる流体が蓄積しうる地質環境としては、堆積物の埋没が起こる深い堆積盆地を想定した。

このように、当初予定になかった調査を通して、生成過程の異なる新たな高塩分温泉の存在をまたひとつ知ることになるとともに、 CO_2 に富んだ食塩 (Na-Cl) 組成の高塩分温泉水の全てがスラブ脱水流体と関係づけられるわけではなく、高塩分温泉水の起源を議論するには同位体や微量元素のデータが不可欠であることを強く認識させられた。

4. おわりに

結びにかえて、ここでは、Rochester 大学 (アメリカ合衆国) の Udo Fehn 教授と共同で行った、当時最新のヨウ素年代測定法をスラブ脱水流体由来の温泉に応用した研究 (Tomaru et al., 2007) で得たデータを再解析することで明らかとなったこと (大沢、2018) を紹介し、本講演を終えることにする。

網田ほか (2014) でスラブ脱水流体由来であると判定した大分平野の温泉 (O2) の放射性ヨウ素同位体 (^{129}I) の分析値を ^{129}I の放射壊変曲線に照らしてヨウ素年代を算出したところ、1,300 万年前という値が得られた。 ^{129}I は大気中で生成する放射性元素であるので、大気から海底堆積物に移行した ^{129}I がフィリピン海プレートに乗ってマントルへと沈み込み、温泉の直下深さ約 100 km で発生するスラブ脱水流体とともに上昇移動し、最終的に地表付近に到着したということを示しており、その移動に

1,300 万年を要したということになる。沈み込み開始地点から温泉直下の脱水地点までスラブの移動に要する時間は、現在の沈み込み速度(およそ 5 cm/年)が続いてきたとして約 600 万年と見積もられる。従って、温泉の直下深さ約 100 km で発生した脱水流体が地表まで上昇してくるのに要する時間は、(1300-600) 万年となるので、流体の上昇速度は 100 km/700 万年=1.4 cm/年となる。この値は、中島・鳥海(1996)によって推測されている地殻深部のクラックによる水の移動速度の 3 cm/年とよく合っており、地球内部における水の移動は実にゆっくりしたものであると思われる。参考までに、プレートの沈み込みと関係の無い宮崎平野の温泉のヨウ素年代はおよそ 3,000 万年~6,000 万年前の値が得られ、温泉水が貯留されていると考えられる古第三紀の地層(日南層群や日向層群)の地質年代の範囲(2,400~6,500 万年)(小林・

矢野、2007)内に収まり、温泉の成因と年代に矛盾がない。

以上紹介してきた私たちの研究は、「島弧に沈み込む海洋プレートから脱水する流体に由来する温泉を探す」というはっきりした目的をもって 2003 年 11 月に最初の野外調査に出かけているので、今年(2019 年)でかれこれ 15 年近くが経過したことになる。その間、研究協力をして下さった多くの方々に様々な形で支えられながら何とか研究を続けることができ、研究成果もそれなりに公表することができた。特に、京都大学理学研究科教授(現在、研究科長)の平島崇男先生と秋田大学理工学研究科の網田和宏さんは、密に連絡を取りながら共同研究をして下さった。最後になりましたが、ここに記して深く感謝いたします。

質疑応答



齋藤恭一 先生

【齋藤】大沢先生、どうもありがとうございました。会場の方からご質問がございましたら、挙手をお願いします。

【会場】非常に面白いお話で、興味深く聴かせていただきました。今、先生はプレート脱水型の温泉をメインにお探しになっていらっしゃいますが、たとえば大分平野の温泉の中でどれがプレート脱水型と思われる温泉か教えていただけますでしょうか。

【大沢】大分平野にあるプレート脱水型の温泉としては、大分市坂ノ市にある病院が所有している井戸から出てい

る天然温泉がございます。

【会場】どうもありがとうございました。もう一つ質問させていただきます。私が行ったことがある宮崎県の鹿野田神社、大分県の六ヶ迫にも塩泉があります。どちらもプレート脱水型ではないと思いますが、どのタイプの塩泉か分かっていますでしょうか。

【大沢】鹿野田は、あまり踏み込んで研究していないので、その成因は特定できていません。また、六ヶ迫は温泉が薄すぎて成因が分かりません。自然湧出で、天水が入って希釈されているため、見たい情報が見つらなくなっているので成因を明らかにすることはできません。たぶんプレート脱水型ではないかと思いますが、断定することはできません。

【会場】六ヶ迫の方は飲泉に利用されており、また、鹿野田は神社に大事にされているということで、温泉の成因と併せて分かれば非常に面白いと思って質問しました。また分かったら教えてください。どうもありがとうございました。

【齋藤】本日は大変貴重なお話をいただきましたので、これから我々が温泉に入るとき、もっと深いところで起こっていることを考えながら、しみじみと温泉に浸れるようになるかと思います。本日は、お忙しい中、遠方からご講演にいらしていただき、ありがとうございました。先生のご研究の益々のご発展をお祈りして、お礼の拍手で終わりたいと思います。どうもありがとうございました。

講演－2

海底温泉で形成される海底熱水鉱床

木川 栄一

海洋研究開発機構海底資源センター
企画調整統括

座長：上ノ山 周

横浜国立大学大学院 教授



木川栄一 先生

ここでいう海底温泉とは海底より噴き出している熱い海水のことであり、世界で初めて目視確認されたのは1977年のことである。その後、海底温泉は、海面付近の浅いところから水深4,960メートルの深海でも観察されており、熱源として考えられるのは海底直下の火山活動で、陸上の多くの温泉と同様である。ただし、実際に観察されるのが地表付近である温泉と違い深海底であることから、水圧の関係で海底温泉の水温は400℃を越すまに熱水と呼ばれる高温に達する。海底下まで上昇した1,200℃のマグマと低温の海水が接触することにより、熱水中にマグマ中の有用な(金属)元素が抽出され、その熱水が海底に噴出することにより冷却されて沈殿し生成する鉱体が海底熱水鉱床である。主成分は鉄、鉛、亜鉛、銅の硫化物であるが、銀(硫化物)、金も含まれる。

海底熱水鉱床が生成されていると考えられる海底熱水系は線上の特徴的な分布を示す。これは成因となる海底の火山活動がごく限られた海域でしか起こっていないためである。具体的には、海底近傍での火山性マグマ活動にはカテゴリー分けで以下の4つのタイプがある。

1) 中央海嶺: 所謂海洋プレートが生成される海嶺と呼ばれる大規模な海底山脈である中央海嶺がまずあげられる。中央海嶺の総延長は約7万キロあるが、これはすなわち地球2周分ほどの長大な活火山山脈が海底にあり、そこで海底熱水鉱床が生成されているということである。

2) ホットスポット: 海洋プレートよりもさらに深いマントル

内深部で発生した高温異常域の上昇が原因となって海底付近で引き起こされるマグマ活動があり、ホットスポットという。典型例としてあげられるのはハワイ諸島である。ホットスポットの海域の海底では海底熱水鉱床は生成されていると考えられるものの、マグマの総量は4つのタイプの中では一番小さい。

3) 島弧型火山: 島弧型火山は、別のプレートの下に沈み込んだ海洋プレートによりマントル深部で生じるマグマ活動が原因となるもので、現在、我が国の領海拡大に一役買っている西之島新島をはじめとした伊豆小笠原諸島海域、そして日本列島の火山も学術的にはこの範疇に入る。

4) 背弧海盆: 背弧海盆での海底火山活動は、島弧型火山活動とほぼ平行な配列で起こることが知られているが、両者の決定的な相違は、前者が伸長場であるのに対し、後者は圧縮場であることである。島弧型火山活動のマグマを引き起こした海洋プレートの沈み込みによって誘発されたマントル内の反流によるマントル物質の上昇及び海水の流入が背弧海盆での海底火山活動に関連するとされているが不明な点が多い。上述したように伸長場であることも関係してか、供給されるマグマの量が圧縮場の島弧型火山に比べて多く、沖縄トラフなどの背弧海盆でこれまで発見された海底熱水鉱床の規模も大きい。

この4タイプの中では、海嶺のマグマ活動の規模が圧倒的に大きいと考えられるが、産業化という観点では、

海嶺に準じた規模を持ち、陸から近く水深が浅い背弧海盆で生成される海底熱水鉱床が一番適しているといえる。

海底の活動的熱水系(海底温泉)が海水の組成に及ぼす影響について一つの興味深い事実がある。海底熱水活動が確認される1970年代までは河川水や降雨など大気からの物質供給と海中・堆積物中の微生物活動、続成作用などによる物質除去の収支バランスはどう見積もっても合わなかった一方、海水と河川水の化学組成が大きく異なるにも関わらず、少なくとも過去1億年における海水の化学組成は不変であることであった。海底熱水系でおきている地球内部からの化学成分の供給と化学反応系に伴う元素の除去の果たす役割を考慮することにより、これらを統一的に理解することができるのではないかと考えられている。

海底温泉で生成される海底熱水鉱床の品位、言い換えればマグマから熱水への金属の溶出・溶解については、温度、火山ガス、塩が果たす役割が大きい。温度については、高温になるほどより多くの金属が溶け、火山ガスは熱水に溶けると酸を生じ、この酸が金属を溶かす。熱水中の塩(Cl)のため塩化物錯体の形で溶存するマグ

マ中の金属の量は、同じ温度の純水に比べて数百から数千倍であることがわかっている。つまり、塩があれば、それだけ金属が溶けるということである。塩の果たす役割は、海底熱水鉱床の形成においても見いだすことができるのである。

陸上で生成される熱水鉱床は、海底熱水鉱床と同様にマグマと水の反応によるものであるが、介在するのは海水ではなく地下水(真水)である。本日の別の講演で解説されると思うが、陸上にも高塩分温泉は存在し、その塩の起源としては、地殻変動などで陸上に地下水として地中深部に閉じ込められた海水(化石水)や、沈み込んだ海洋プレート起源の島弧マグマ中にもともと存在する塩分が火山ガスとなって地下水に溶けたもの、さらには今ひとつ原因がわからない有馬温泉のようなものまである。いずれの場合も、上述した海底温泉と同程度の金属濃集寄与は期待できないが、局所的なものに限れば高品位な濃集域を形成する可能性はあるかもしれない。

最後に海底熱水鉱床の成因についてのより詳細な記述は、<https://www.jamstec.go.jp/sip/pdf/resultList01.pdf>を参照されたい。

質疑応答



上ノ山周 先生

【上ノ山】木川先生、夢のある楽しいお話をどうもありがとうございました。会場から質問があれば、よろしくお願ひします。最初に、私から質問させていただきます。商業化まで 2027 年度を目標にされているということですが、一番大きなハードルは 1 日に 5 千トン揚げなければいけないことでしょうか。

【木川】そうですね。選鉱・製錬はできることが分かっていますが、陸上の熱水鉱床と違って 1 日 5 千トン揚げることはだいぶ大変です。2 年前の海域試験で実際に使った機械の 10 倍くらいの大きなものを使わないと、たぶんできないので、本当に大変だと思います。

【上ノ山】分かりました。ありがとうございました。会場の方からご質問はありますでしょうか。

【会場】鉱床の場所と技術が分かると、他の国に持って行かれそうで怖いのですが、そういった点はどのようにお考えでしょうか。

【木川】その通りで、発表すると他の国が勝手に来て調査してしまう恐れがあります。我々もそういう懸念は常に持っていて、注意を払いながら発表内容にも気を付けています。大事な日本の資産なので、しっかり守るということを念頭においてやっており、情報開示にも気を使っています。

【会場】ありがとうございました。

【上ノ山】他に如何でしょうか。

【会場】最近、台風も大きなものが増えてきており、地球温暖化が騒がれていますが、先生のお話だと「そうじゃない」という感じがしたのですが、如何でしょうか。

【木川】講演の中でははっきりとは言いませんでしたが、今地球は寒冷化しているという研究者もたくさんいます。我々の専門領域は地球という惑星の 46 億年を見えています。それに対して、温暖化の根拠は 100 年程度のシミュレーションでありまして、科学的には、はっきりと決着していないと思います。この問題については、もっと科学的な根拠をしっかりとさせる必要が、まだまだあると思います。

【会場】ありがとうございました。

【上ノ山】まだまだ質問が尽きないと思いますが、時間となりました。最後に拍手で先生に感謝したいと思います。どうもありがとうございました。

講演－3

塩化物泉（食塩泉）の医学的効果

前田 眞治

国際医療福祉大学大学院教授

座長：菱田 明

浜松医科大学名誉教授



前田眞治 先生

塩化物泉は温泉に溶けている成分が 1 kg 中 1,000 mg 以上ある温泉で、その成分のうち陰イオンの中の塩素イオン Cl⁻が主な成分であるものが塩化物泉である。療養泉では塩類泉に分類され、一般には食塩泉と呼ばれている。以前は最も多い泉質であったが、温泉を掘り出す技術の発達により日本各地で温泉が湧出し、含まれる成分が 1 kg 中 1,000 mg 以下と少ない単純温泉に次いで現在は 2 番目に多い温泉となっている。

1. 塩化物泉の温熱効果

塩化物泉の特徴的な効果は、入浴後すぐに温まり、浴槽から出てもいつまでもポカポカとして冷めにくいという熱の湯である。

早く温まるということは体温上昇が早く起こり、入浴後も上がり続け高い体温上昇が人体に加わる。このメカニズムはまだ明確にわかっているわけではないが、ナトリウムが血管内に入りやすく血液量が増すためとか、熱が伝わりやすいなどと言われている。20°C・1 kg の水を 1°C あげるのに 17,690 カロリー（4,182 ジュール×4.23 カロリー＝17,690 カロリー）必要であり、海水（約 4%の食塩水と考える）では 16,670 カロリー（3,940 ジュール）であり、水の方が温まりにくく冷めにくい。つまり 4%の食塩水の方が 1°C 下がると 16,670 カロリー与えられるが、水は 17,690 カロリー与えられる。水の方がよく温まることになる。

さらに、熱伝導率（1°Cの温度差がある 1 m²の板に 1

秒間に流れる熱量で小さいほど熱が伝わりにくい）も、水が 1.43、3.9%食塩水が 1.40 と水の方が熱を伝えやすい物理的性質をもっている。比熱と熱伝導率の特性からは水の方が食塩水より熱を多く伝えやすいことになる。

しかし、実際には同じ浴槽の大きさで実験しても食塩水の方が、体温上昇効果があり、これら 2 つの要素以外の加熱要素を考える必要があり、ナトリウムなどが含まれる水溶液は人体に対して熱を多く伝えるという化学的要因を考えているが、知る限り、いまだ結論は得られていない。

実際に測定してみても、水道水に比較し塩化ナトリウム濃度が増すにつれ体温上昇効果が認められ、実際にも塩化物泉では体が温まりやすいことが実感される。

一方、出浴後いつまでもポカポカするといった保温効果は、以前より塩類のベールをまとったようになるといわれている。実際に測定しても塩化物泉では出浴後の体温下降は緩徐であることが認められている。これは食塩水を蒸発させてみると食塩の結晶が残るように、肌に食塩の固体が残り、それが全身の肌に広がるようになるため、食塩のベールをまとったようになり、身体の体温を逃がさないためと考えている。

このように塩化物泉は湯に入ると早く体温が上がり、すぐに温まりやすいことと、湯から出てもいつまでもポカポカとするといった、いわゆる「熱の湯」である。この熱の効果は他の温泉にみられる温熱効果に比べても大きく、

さまざまな温熱効果が期待できる。

このような効果から、冷え性や肩こり・腰痛などの疼痛性疾患、関節痛などをきたすリウマチ様疾患の痛み、などに効果がある。

温泉にはこのようなナトリウムのような陽イオンと、塩素のような陰イオンがあり、これらが塩類であり、ほぼ共通した特性をもち、その代表的なものが塩化物泉である。

温熱効果には次のようなものがある。

- a)疼痛緩和: 知覚神経のうち C 線維の疼痛閾値上昇。循環改善に伴う疼痛発痛物質の除去
- b)筋・関節拘縮の改善: 筋腱軟部組織柔軟化、腰痛、肩こり、50 肩など
- c)血行促進効果: 筋肉疲労回復、皮膚疾患改善など
- d)免疫力増強作用: NK 細胞活性(細胞性免疫)などの向上
- e)タンパク質修復機能: HSP70(細胞修復機能亢進)の上昇

a)疼痛緩和

疼痛緩和作用の一つに痛みを感じる神経のうち、細い C 繊維が鈍感になり痛みを感じにくくなる。温泉水ではこの作用が顕著である。

b)筋・関節拘縮の改善: 筋腱軟部組織柔軟化

また、筋肉の緊張度を上げ突っ張らせるような神経も抑えられ、筋肉の緊張が落ち、筋肉がやわらぐ。

筋肉や軟部組織を柔軟化し、筋肉や腱が熱によって伸びることで緊張が和らぐ。

c)血行促進効果

人体内の酵素などは一定の体温で最も効率よく働くことができ、その活動をはじめとする人間の生命活動を維持するために、常に体温を一定にしようと働いている。外部から熱を与えると、その熱を他の場所に移動して体温を下げることで、その働きを保持するのが正常な生理活動である。

入浴で体に熱が入ると、その熱をいち早く他の場所に移動する必要があるため、その場所の血液循環を良くし、他の場所に熱を運び、過剰な熱を分散する。入浴すると皮膚が赤くなるのは血行が良くなっていることを示す。

血液循環が良くなるということは、その場所に溜まった老廃物などが洗い流され、新しい栄養や酸素など

が来て結果的にその組織がリフレッシュされることにつながる。

血行促進効果は、血流を増加させ、血管を拡張し、痛みを和らげ、新陳代謝を促進し、疲れを取り、きり傷などを早く治す。

d)免疫力増強作用

ヒトは熱を受けると元の体温にもどろうとする。その熱が高すぎたり強すぎたりする刺激だと、細胞や組織がこわれ、やけどや異常な反応が生じる。

適度な温熱だと、次に熱の刺激がきても大丈夫なように防御反応を取るようになる。その反応は熱だけでなく様々な害となるものに対して防御する。その一つに免疫力や細胞修復機能を高めたりすることがある。

免疫力をつかさどるリンパ球の一つに NK 細胞がある。NK 細胞はおもに血液中に存在し、リンパ球に含まれる免疫細胞の一つで、生まれつき(ナチュラル)外敵をやっつける(キラー)能力を備えているため「ナチュラルキラー(NK)細胞」と呼ばれている。

NK 細胞は人間の体内を幅広く行動し、がん細胞やウイルス感染細胞などの異常細胞を発見すると、攻撃を仕掛ける。NK 細胞活性が強いと免疫機能は高くなる。塩化物泉に入って適度に体温を上げると、その後 2~3 日間は高い状態が続き免疫力が上がり、4 日くらいすると元にもどる。

e)タンパク質修復機能の亢進

組織を修復するタンパク質に熱ショックタンパク質 heat shock proteins (HSP) がある。中でも分子量 70 万の HSP70 は、新たに合成されたアミノ酸複合体の折れたたみ、タンパク質の輸送と品質管理、不要になったタンパク質の分解など、タンパク質の一生にわたり面倒をみつづけているストレスタンパク質の一種である。細胞が損傷されても新しいタンパク質が作られたり、修復されてリフレッシュする。こんな働きが温泉にある。

HSP70 は、平常状態の細胞内に広く分布するタンパク質で、温熱、虚血、感染、放射線等の種々のストレスによっても誘導され、タンパク質の変性を抑制するとともに、変性したタンパク質の修復を行うことが知られている。

温浴を行うと HSP70 は上昇する。HSP70 は温熱刺

激後に種々のタンパク質を修復することで、疲労後のリフレッシュや健康増進の一翼を担っているものとして注目されている。

このタンパク質は温熱刺激によって誘導されることが知られており、温熱効果の高い入浴で産生されれば、入浴が健康増進にも貢献することができると考えられる。

2. 細菌が繁殖しづらい塩化物泉

塩化物泉の食塩濃度が濃いと、いわゆる塩漬けと同じ効果がある。塩分が濃い温水の中では多くの細菌が繁殖できないという特性をもっている。この特性から、濃い塩化物泉に入浴すると皮膚表面では細菌が増殖することができず、化膿することが避けられる。塩分濃度としては2%以上のものが有用と考えられている。このことにより傷の治りがよいなどの効果がある。

3. 心身のリラックス効果

温熱作用により体が温まると、体がリラックスする副交感神経系が出浴後優位になる傾向があり、ゆったりとした気分になり、日常生活や仕事で心身のストレスがあるような人に有用である。42°Cの塩化物泉に15分間入浴した時の、心理的ストレスの指標である唾液腺クロモグラニン A の変化を水道水浴と比較すると、塩化物泉の方

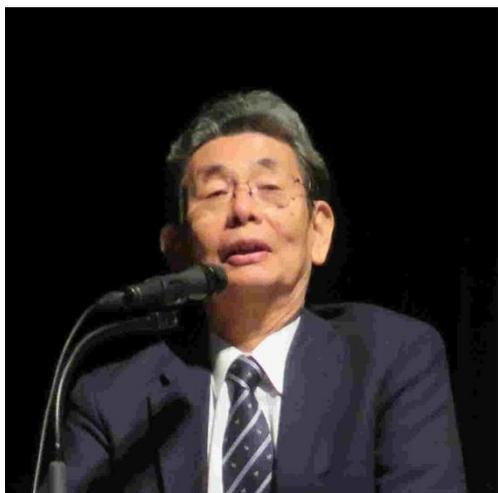
が、入浴前と入浴後のクロモグラニン A 蛋白換算値の差が大きく、リラックスできることが分かる。

4. 塩化物泉の飲む効果

塩化物泉を飲むことは食塩水を飲むことと同じと考えられる。体にナトリウムと塩素を適切な量供給することは生きていく上で必要なことで、その食塩を含む塩化物泉は水分とともに胃腸から吸収されることを促進することから、胃腸の動きや働きを活性化し、栄養補給などにも効果がある。日本人は諸外国の人に比較して塩分を多く取っている傾向にあり、これが高血圧などを引き起こし脳卒中などの病気の原因ともなっている。適量の摂取は必要ことであるが、諸外国では5g程度であるが、日本人もこれに近づけ厚生労働省は1日7~8gを目標量としている。そこで環境省が温泉の飲泉量の規定を作り、1日のすべての塩分量を温泉から摂る必要性はなく、他の食物からの塩分量にも大きな影響をおよぼさない程度として、温泉から摂取する塩分量をナトリウム量に換算して1,200mgと規定している。

飲泉は多くても1日500ml以下にすることが求められており、塩分濃度が薄ければ500ml飲泉することは可能である。しかし、塩分濃度の濃いものはナトリウム量から1日最大量を求め制限して、飲泉する人の健康を守っているため、規定を守って飲泉していただきたい。

質疑応答



菱田明 先生

【菱田】前田先生、どうもありがとうございました。我々は温泉に入るとリラックスして気分が良くなるということで、健康に良いだろうと思いながら温泉を楽しんでいるわけですが、そういったことにはどのような科学的な根拠があるのかについて、いろいろとお話を伺うことができました。せっかくなので、会場の皆様から質問がございましたらお願いします。

【会場】温泉の効能を分かりやすくお話していただき、ありがとうございました。本日は塩化物泉のお話だったのですが、放射能泉について教えてください。福島原発事故の件もあって心配なのですが、放射能泉の入浴にあたり、被爆の観点から入浴する時間の制限などはあるのでしょうか。また、放射能泉の効能を教えてください。

【前田】放射能泉に入っているかどうか、どのくらいの時間入っているのかというのは、放射線の量によって決まります。日本の温泉の場合、増富温泉や栃尾又温泉、玉川温泉など、比較的放射線が高い温泉でも人間の許容量には全然達していません。そのため少々長く入っていても大丈夫です。日本の放射能泉はほとんど安全です。また、効能について申し上げますと、日本の放射能泉はラドンが空中に飛散している場合が多いので、入浴しなくても温泉地に行き空気を吸っているだけでもラドンを吸収することができ、その放射能は膵臓などの内分泌臓器や骨髄に集まり、いろいろな作用を示すと言われております。しかしながら、その効果の学問的な裏付け

は残念ながらないのが実情です。放射線が細胞を傷つけ、それを修復する酵素などが出てきて良い効果をもたらすとされるホルミシス効果というのがありますが、日本の場合にはその実例は出てきておりません。なお、ドイツなど諸外国では強い放射能泉があり、関節炎が緩和されるなどの客観的なデータがあります。また、日本の場合では、実験の段階ではありますが、痛風の原因である尿酸を体外に排出し易くするという効果があり、放射能泉の一つの効果として泉質別の適応症に掲げています。【会場】ありがとうございました。

【菱田】他に如何でしょうか。

【会場】塩化物泉は温まりやすく冷めにくい特徴があり、冷めにくいのは皮膚に塩の結晶ができるからということで、温まりやすいメカニズムは未だに良く分からないとお話でしたが、どういふ方々がそれを調べていて、分かってくるような目途が立っているのかどうか教えてください。

【前田】細胞レベルでナトリウムチャンネルが開くかどうかは分かっていない状況ですので、難しい問題です。熱がかかったり血液のポリウムが増えれば血流が増えるので、一気に NO が出てくるのですが、その前のメカニズムが分かっていません。単に温度の低い食塩水に入っても血流はそれほど増えません。温度が高い状態でないと駄目なので、最初のきっかけは温度で作用するのだと思います。それに加えて食塩の相乗効果で血管が開いてくるという考え方もあります。明確な回答が出ないのが現状です。また、それを研究している方もなかなか見当たりません。

【会場】ありがとうございました。

【菱田】他に如何でしょうか。私からも幾つか質問させていただきたいと思います。炭酸温水と水道温水で痛みの刺激や免疫反応が違うということは、同じ水温で、炭酸温水の方がより体温が上がるという温度を介する差と理解してよろしいでしょうか。

【前田】そうです。体温上昇の差です。食塩泉と比較すれば良かったのですが、食塩泉は少し臭いがします。ダブルブラインドで温度を上げた時の効果を見たかったので、匂いがない炭酸温水で実験しました。温度が上がっていけば効果が出ます。なお、食塩でもほぼ同じ実験結果が得られております。

【菱田】温泉の種類には塩化物泉のほか、例えば鉄や硫

黄などが含まれているものがありますが、それらと塩化物泉との違いはあるのでしょうか。

【前田】まず、炭酸泉とか硫黄泉の場合は血管が開くメカニズムが塩化物泉とは全く違います。炭酸や硫黄は血管拡張物質と呼ばれまして、温度が低くても血管が開きます。含まれる成分によっては、体温の上昇の仕方も塩化物泉とは若干異なると思っております。そのへんは成分表を見ながら入浴していただければ、一つの楽しみになるかと思えます。

【菱田】もう一つ私から質問させていただきます。今日は温泉の良い面のお話を聴かせていただきましたが、「湯あたり」とはどのような現象と考えれば良いのでしょうか。

【前田】温泉に入浴することで人間は熱や成分により刺激を受けます。刺激の度合いが強い硫黄泉や濃い食塩泉などに何日も入ると、その刺激に人間の体が慣れようとし、3日～1週間くらいはその刺激に対して、体の中のホルモンや自律神経のバランスを崩して、温泉の環境に慣れようとし、だんだんと元に戻りますが、そのバランスが崩れた状態がいわゆる「湯あたり」というもので、食欲不振、吐き気、微熱などの症状が起こります。一方、高い温度のお湯に入ったときに出てくるのは、広い意味では「湯あたり」ですが、ホルモン上の問題ではなく、熱による反応で、今ご説明したメカニズムとは異なります。「湯あたり」に対しては、通常、温泉に入る回数を減らしたり、入るのを止めれば良くなります。もうひとつ、酸性泉と言われる強い酸性の温泉に入ると一気に肌が荒れます。それも温泉反応として「湯あたり」と言っています。温泉に何度も続けて入ると一気に「湯あたり」や「湯疲れ」になってしまいますので、1日に1～2回程度に留めてい

ただければ良いと思います。

【菱田】ありがとうございました。他にございますか。

【会場】塩化物泉に入ると効果があるのは分かりましたが、サウナで塩サウナという体に塩を塗って入るサウナがありますが、塩化物泉と効果は同じでしょうか。

【前田】塩を塗ったり、塩水を掛けたりすることは、保温力を高め、体に入った熱を外に出づらくし、体温の上昇効果があります。また、塩水を掛けると湿度が相当上がり、塩の濃度も上がりますので汗がかきづらくなったりします。そういったことから、体温の上昇効果は塩化物泉と同じくらいあると思います。サウナは高温の乾熱サウナで80℃、低温で60℃ですが、汗をたくさんかこうとすれば、塩を使うことも良いと思います。もう一つの効果を申し上げますと、空気中にミストとして漂っている塩は、人体にとって異物になります。それを鼻から吸うと気管に付着します。付着した塩は異物ですから気管支の繊毛が出そうとします。このように塩のミストは繊毛の働きを活発にします。これをヨーロッパなどでは塩化物泉の吸入療法として盛んに行われています。また、海岸の近くを散歩しますと、こういったことが自然に行われますので、海岸療法として肺の機能が良くなるということがあります。日本では三朝温泉のミスト浴というものがございます。こういった温泉には肺の病気のために訪れる患者さんがたくさんいらっしゃいます。

【会場】どうもありがとうございました。

【菱田】非常に面白いお話を聞かせていただきました。時間でございますので、これで終わらせていただきます。最後に皆さんの拍手で前田先生に感謝したいと思います。どうもありがとうございました。