

地球物理から見た温泉の諸問題

北海道大学名誉教授

福 富 孝 治

On the Origin of Heat and Water of the Hot Springs Seen from Geophysical Point of View

Takaharu FUKUTOMI

Professor Emeritus of Hokkaido University

只今座長の岩崎先生からご紹介頂きました福富でございます。今まで地球物理関係のいろいろな方がやられました仕事、また自分のやりましたことをまとめまして、今日は「地球物理から見た温泉の諸問題」という題でお話する次第です。本年は、先程会長からお話ございましたように、日本温泉科学会が創立しまして50周年で、こういう記念の講演会が本日開かれるようになりましたのは、誠に御同慶の至りでございます。と同時にこの会の開催にあたりまして、鳥居会長、そして大島先生その他幹事の方々がいろいろお世話下さいましたことに厚く御礼申し上げます。また朝日新聞社からも後援して頂いたとのことで、厚く感謝する次第でございます。

今日は、全国的な話をするのは少し難しいので、東北地方に限りまして話してみたいと思います。図1は東北地方の温泉の分布図でありまして、中央を南北に走る那須火山帯に沿いまして温泉が沢山ありますが、日本海側にも温泉は湧出しております。東側の太平洋にかけまして北上山地がありますが、この辺は高温の温泉は全くないということに注目頂きたいと思います。

図2は火山の分布図で、温泉は火山と密接な関係があるということをご存じの通りですが、黒丸は活火山、白丸は第四紀の火山の位置を示した図で、杉村新先生が「科学」に出されましたものを拝借しました。また黒い線は、いわゆる火山の前線と呼ばれているものであります。次の図3は、江戸時代以前に起った大地震の分布で、比較的浅い地殻の中で起った地震と考えてよいと思います。

最近の地球物理学の大発見の一つ、プレートテクトニクスという言葉で、新聞や本などでよくご覧になっていると思います。以前は海洋底拡大説という名で呼ばれておりましたが、熱いマンツルの融けた熔岩が海底に昇り、冷え固まり、これがマンツル中の対流により流れて、日本の島にぶつかって下に潜り込んでいるという状態を図4に示しました。この海洋底のプレートが日本の下に潜り込み、マンツルと摩擦した部分で深さ700km位のところまで深層地震が起っております。

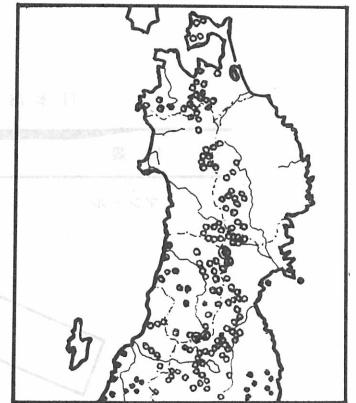


図1 東北地方における温泉分布

これは、あまり被害のない、いわゆる深い地震であります。ところが、表層には日本列島を造っている地殻が大陸の方から続いておりますが、プレートが丁度日本海溝のところまで地殻とぶつかって、下に潜り込んでいる訳で、ここで上の地殻とこすりあっております。外側地震帯といって、津波を伴う大きな地震が起るのがこの部分です。図3で那須火山帯よりも日本海側で地震が沢山起ってございましたが、日本海側は地殻が非常に軟弱になっているらしく、海洋底プレートがぶつかるとこちら側に押されますので、地殻変動を受け地震が起るということになります。プレートが潜り込む時に、マンツルの部分と日本列島の下に当る辺りで摩擦を起し、マンツルの一部が融けて出来るいわゆる玄武岩質のマグマが上昇して、日本列島の下に当る地殻の下に、薄くではあります溜っているものと考えられます。外側地震帯の部分でプレートがマンツルの中に潜る時、浅い所にあったものが深い所に潜るのですから、浮力で上の地殻を押し上げるわけでありまして。すると地殻の弾性で直ぐの部分では持ちこたえられますが、西方に離れると持ちこたえられなくなって、割れ目を生じてマグマが上ってくるということになります。これが火山の前線、今の那須火山帯であると思われまして。この海洋底プレートの動く速さは、大体1年間2cmから10cm位、非常に僅かではあります、動いております。

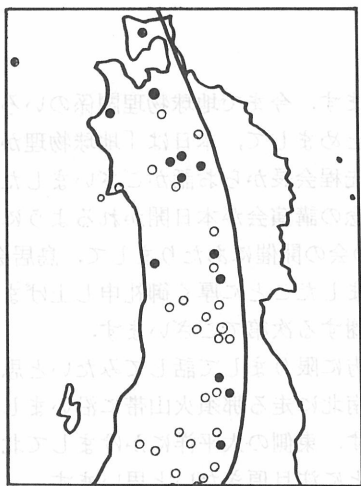


図2 東北地方における火山分布
(黒丸：活火山，白丸：第四紀火山)

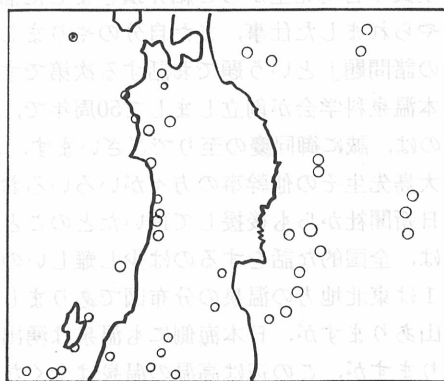


図3 江戸時代以前の大地震の分布

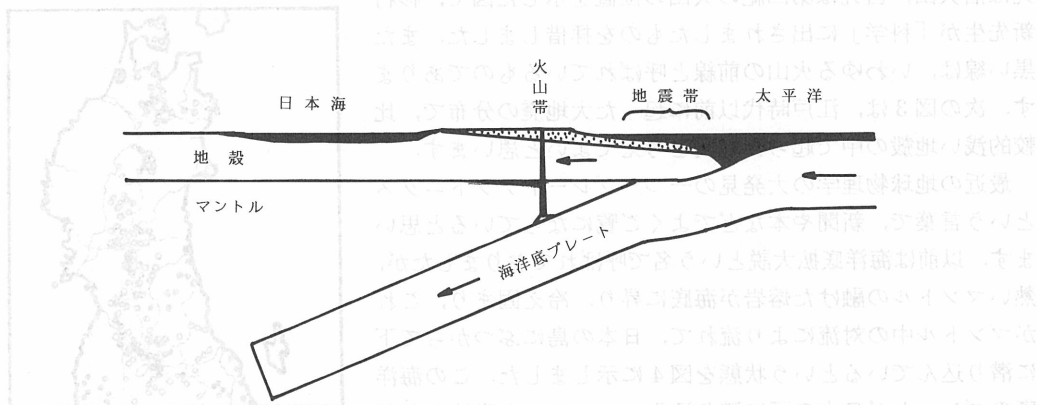


図4 東北地方の地下構造の説明図

次にプレートが日本列島の地下に潜入し始めた時期、北上山地が隆起を始めた時期、那須火山帯の生成の時期について考えてみましょう。これらの時期はおよそ同時期であったと思われます。北上川の中流に古生代の鳥の巣石灰岩があり、多くの海百合(海棲動物)の化石が入っています。また石巻附近には、中生代末期の地層の中にアンモン貝に近いセラタイトの貝殻があり、仙台の近くには第三紀の地層があります。即ち北上山地は、古生代から中生代、新生代の第三紀時代迄は、海底で地層の堆積が行われていたことを示しています。

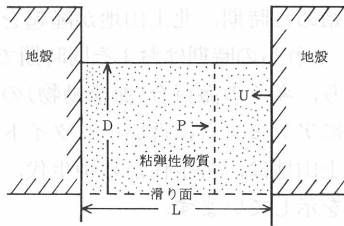
一方火山の研究から、本邦の火山活動は新生代の新第三紀中新世(ほぼ今から2000万年前)の時代と、第四紀洪積世、沖積世(ほぼ100万年前から現代に至る)に盛んであったといわれます。以上の結果を総合すれば、上記の問題の時期は新第三紀中新世であったと推定されます。

次に地殻熱流量という言葉がありますが、地球の中は温いので熱が内部から地殻を通して表面に流れ出すわけです。陸地の場合ですと、ボーリングによって表面から下方に向かって温度がどれだけ上がるかという傾きが判ります。またボーリングのコアをとりまして熱伝導率を測定し、これらの積から表面に流れ出ている熱流量が判るわけであります。東北地方では、北上山地から太平洋の方は熱流量が比較的小さく、那須火山帯から西方日本海側は大きいのですが、表面 1 cm^2 当り1秒間に流れ出す熱量をカロリーで測り、 $10^{-6}\text{ cal/cm}^2\cdot\text{s}$ で表わして、これをヒートフローユニット(H.F.U)と申しております。世界各地でも測られていますが、世界の平均は1.2位であると言われております。

地球の表面近くには花崗岩の層、次いで玄武岩の層があり、その下に超塩基性岩から成るマントルが存在すると言われております。地殻の中には、 ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{232}Th 、そして ^{40}K というような放射性の元素がかなり含まれておりまして、これらが崩壊して次の元素になると時にアルファ粒子を放出します。これがまわりの岩石に当たって熱を生ずるわけであります。その地殻の柱からどの位熱が出るか計算してみますと、ヒートフローユニットで表わすと1.2ということで、先ほど述べました世界の平均値とほぼ合っておりますので、この熱は放射性元素が壊れて出たものと考えられるわけですね。

先ほど那須火山帯から日本海側は地盤が悪く、軟弱なところがあると申しましたが、これにプレートテクトニクスの話にもありましたように海洋の方から押されて力がかかるわけです。図5に示しますように、地殻の間に長さが L 、厚さが D という軟弱な地盤があり、これが U 、例えば1年間2 cm押されたとします。すると軟弱な部分は縮んで、上に出て来て結局熱を生ずるわけです。この弱い部分は、粘弾性物質であると考え、 λ を粘性係数、 J を熱の仕事当量として生ずる単位体積当りの熱量を計算すると H で与えられます。例えば、はじめ弱い部分が30 kmあって、それが押されて20 kmになったとすると、10 km縮んだわけですが、この時出る熱 H は $1.61 \times 10^{-12}\text{ cal/cm}^3\cdot\text{s}$ となり、これに厚さ D を掛けるとここから流れ出す熱流量(HD)になります。即ち先ほどのヒートフローユニットで3.22ということで、 $3 \times 10^{-6}\text{ cal/cm}^2\cdot\text{s}$ 位の熱流量が圧縮により地球の表面に生じていることになります。これは一つの例ですが、これで温泉が出来るのかといいますと後で話が出てまいります。この値は熱階級Iに該当します。この値はあまり大きくない、むしろ小さいのですが、北海道の温泉地の56%がこれに該当していることに注目下さい。

次に那須火山帯から西の方の地殻の下には、薄く融けたマグマの層があるのではないかと述べましたが、これが地殻の割れ目から上に昇ってくるのはこのマグマの圧力によるものと思われます。図6にマグマ溜り生成の状態を示しましたが、このマグマの圧力は地殻の重さによって生じているわけですから、地殻の底から割れ目中に昇るマグマの柱の長さ X は図表中の式で与えられます。従って図表の最後を書いてありますように、地表からマグマ溜りまでの深さはおよそ3 kmということになります。マグマ溜りの深さは、実際にいろいろな方法で測定が可能です。



単位体積，単位時間の発熱量

$$H = \lambda (U/L)^2 / J$$

ただし λ : normal viscosity

J : 熱の仕事量

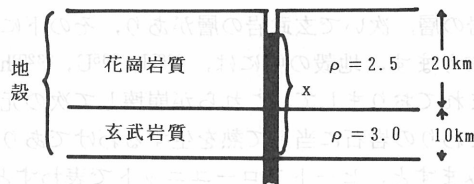
[例]

	t (万年)	L (km)	D (km)	$(U/L)^2$	H (cal/cm ³ •sec)
U = 2 cm/yr	0	30	10	4.48×10^{-28}	} 1.61×10^{-12}
	100	10	30	40.31×10^{-28}	
平均			20	2.24×10^{-27}	

但し， $\lambda \doteq 3 \times 10^{22}$ c.g.s. $J = 4.18 \times 10^7$ erg/cal

$$\therefore H D = 1.61 \times 10^{-12} \times 20 \times 10^5 = 3.22 H.F.U$$

図5 横の圧縮による発熱と温泉の可能性



$$2.5 \times 20 + 3.0 \times 10 = 3.0 \times x$$

$$\therefore x = \frac{80}{3.0} = 26.6 \text{ (km)}$$

Magma の地表からの深さ = $30 - x = 3.4$ km

図6 マグマ溜生成の説明図

例をあげますと，地震波の中には，P波，S波というのがありますが，P波は縦波で音です．S波はねじれ波で，液体の中はP波は通るが，S波は通りません．それで火山の下をってくるような遠い地震を観測致しますと，その火山の下にマグマがあるかないかという推定も出来るわけで，カムチャツカの火山で測定がなされております．もう一つの方法は磁気的な方法であります，ご存じのように温度をだんだん上げて700℃位になりますと，キュリーポイントと申しまして磁性がなくなってしまいます．マグマが入り込んだ時の温度は1200℃位と考えられておりますので，勿論磁性はありません．そこで火山で磁性の測定を致しますと，そこに空洞があるかないかがわかるわけです．このような方法で推定されておりますが，大体地表3 km から10 km 位の深さにマグマ溜りがあるだろうと考えられております．火山が爆発して熔岩を流したり，灰を降らしたりするのは，マグマ溜りのその後の活動ということになります．

マグマ溜りが出来ると，地表から3 km から5 km 位のところにマグマが昇り，図7に示したようにまわりの岩石を融かして横に広がります．ここでは熱伝導の問題として取り扱いますと，地殻の表面から深さがh km のところに半径がR，厚さがDという円柱状のマグマ溜りが存在すると考えます．ここに入ったマグマがどの位熱を出し得るか計算してみますと，はじめ1200℃の

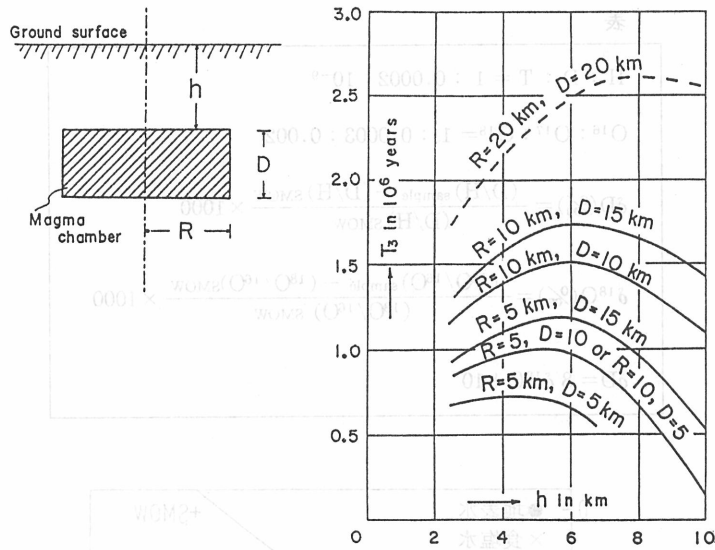


図7 地表下hにある半径R厚さDの円筒状岩漿とその固化体による温泉の寿命の概値

マグマが入って来て、それが900℃位になりますと固化致しますが、その時潜熱を放出します。熔岩の場合は1gに対して90calと言われております。マグマは数%の水を含んでおまして、これが温泉のもとになるという考えもありますが、はじめ1200℃のマグマが900℃になって固化するまで、その間がマグマ中の水が出得る時間ということになりますが、計算の結果8~10万年となります。固化したのから熱がだんだん出て、まわりに地下水がありますと温泉をつくるわけですが、これがどの位年数があるか図にしたものが、図7の右図です。これは地殻の温度傾斜の普通の値、深さ100mについて3℃の2倍の値、100mで6℃になるまでどの位の時間がかかるかを表わしたものです。横軸に深さh、縦軸に時間をとりましたが、100万年を単位として書いてあります。例えば、深さ5km、半径5km、厚さ5kmのマグマ溜りであったとすると、大体70万年位は温泉をつくる熱をマグマは出し得るということになります。

次は地球化学の問題ですが、関連が深いので少し述べさせていただきます。マグマ中の水も地下水もH₂Oで表わせますが、表1にありますように水素は質量数が1のものが大部分ですが、その他に質量数2のドューテリウムと質量数3のトリチウムという同位体があります。その量は普通の水素を1とすると、ドューテリウムは2/10,000位、トリチウムは非常に僅かです。酸素は普通質量数は16ですが、17及び18という質量数の酸素も入っておりまして、その分量は16の酸素を1として、18が2/1,000位、17は3/10,000といった値です。表1の式はアメリカのH. Graig氏等の研究によるもので、ドューテリウム(D)と普通の水素及び酸素-18(¹⁸O)と16の比を測定して、標準物質の同位体比からのずれを千分比(‰)で表わしたもので、それぞれδD、δ¹⁸Oと定義致します。標準物質としては、海水(標準平均海水、SMOW)を用いております。地表水をいろいろ調べてみますと、これはアメリカの結果ですが、図8のようになり、δDとδ¹⁸Oの間には簡単な直線関係があります。式は表1の下に示しました。地表水は、図中の斜めの直線にのっておりますが、温泉は、地熱地帯の高温の温泉からのもので、横軸(δ¹⁸O)に平行な線になっています。この説明として、地表水はδ¹⁸O < 0 に対し火成岩はδ¹⁸O > 0 なので、地表水が地下に潜り込み、温度が高くなって温泉になりまわりの岩石と接触して、この間で同位体交換が起り、¹⁸Oに富んだ水が生成したというわけでありまして。

表 1

$H : D : T = 1 : 0.0002 : 10^{-9}$
$O^{16} : O^{17} : O^{18} = 1 : 0.0003 : 0.002$
$\delta D(\text{‰}) = \frac{(D/H)_{\text{sample}} - (D/H)_{\text{SMOW}}}{(D/H)_{\text{SMOW}}} \times 1000$
$\delta^{18}O(\text{‰}) = \frac{(^{18}O/^{16}O)_{\text{sample}} - (^{18}O/^{16}O)_{\text{SMOW}}}{(^{18}O/^{16}O)_{\text{SMOW}}} \times 1000$
$\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$

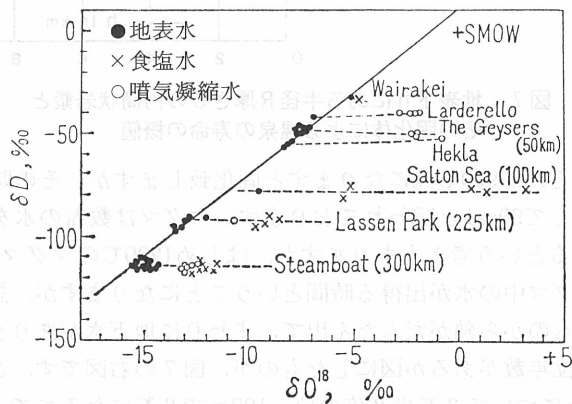


図8 アメリカの温泉水の δD と $\delta^{18}O$ の関係
()内の数字は太平洋岸からの距離

図9は日本におけるもので、秋田大学の松葉谷氏と岡山大学の酒井氏の研究です。地表水は2本の直線の間に入り、日本海寄りの地表水は左側に、太平洋寄りの地表水は右側になるそうです。いろいろな種類の温泉について調べてありますが、ここでは火山に関係のある温泉だけを取り上げてみますと、白丸で表わしたものがそれです。即ち地表水よりも少し $\delta^{18}O$ が大きくなり、地表水の直線から離れて直線的に上昇しております。図10はその結果をまとめたもので、温度の非常に高い噴気を伴っている温泉は(1)で示され、温泉水が地表近くで蒸発する際の同位体効果によるものと言われており、(2)は前述の通り酸素同位体交換によるもの、また(3)は地球深部のマグマに由来する熱水がいろいろな割合で地下水で希釈されたものと考えられます。ただ日本においては、マグマから放出される水の δD が $-20 \sim -40\text{‰}$ という値を持っているのではないかと松葉谷氏は述べており、今後の研究が期待されます。

先ほども申しましたが、温泉は熱階級によって分けることができます。温泉には、熱伝導と温泉水として出る二つの熱がありますが、この両者の和を温泉の熱量として、1分間当り何カロリー出るかを 10^7 を乗じたものを単位として表わします。表2はそれを温泉の熱階級で表わしたもので、例えば 10^7 cal/min 以下をIとし、この熱量の3.2倍したものを一つの指標にとってIIという熱階級といったようにIからVIIまで定義します。表2に北海道の温泉を熱階級に分けてありますが、このようにして表わしてみますと簡単で便利です。大きな地熱地帯、ニュージーランドのワ

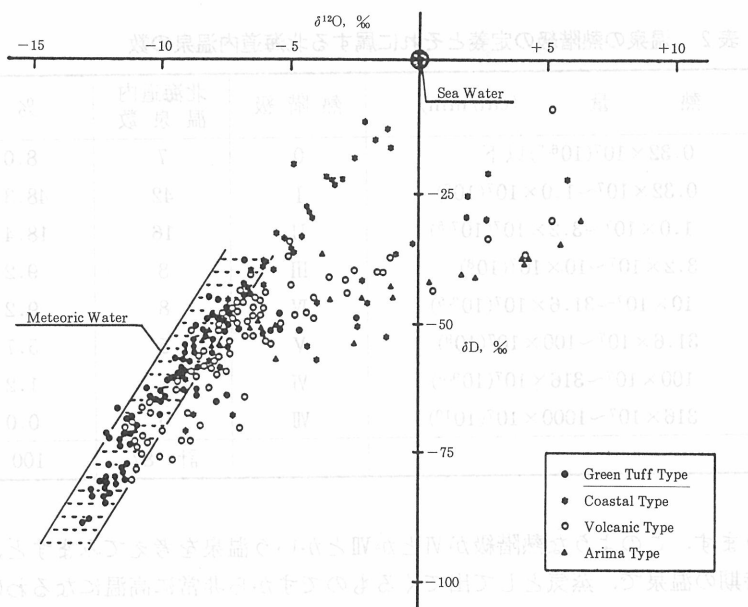


図9 日本の温泉水の δD と $\delta^{18}O$ の関係(松葉谷治氏原図による)

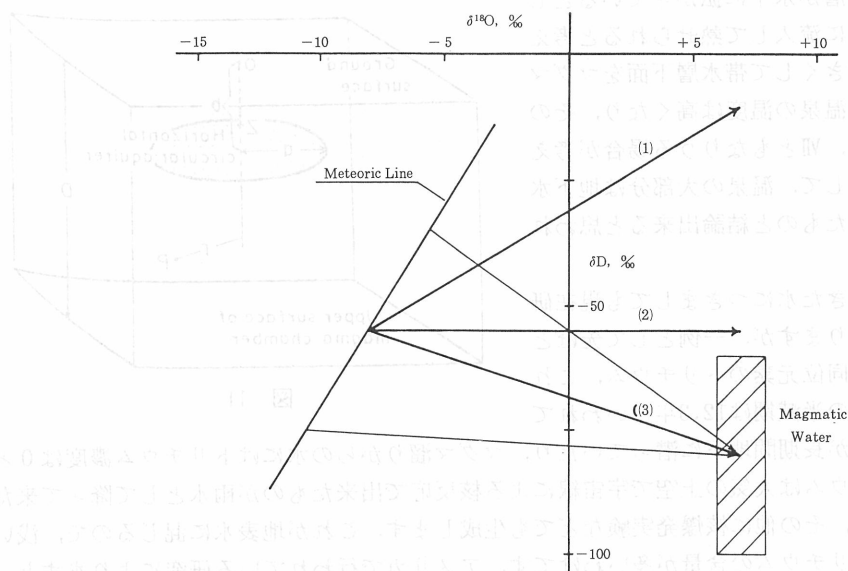


図10 火山性型の熱水の δD と $\delta^{18}O$ の関係(松葉谷治氏原図による)
 (1)は蒸発のさいの同位体効果, (2)は岩石との酸素同位体交換,
 (3)はマグマ水との混合を表わす

イラケイのようなところでは、 700×10^7 となりこれが最高の値と思われます。北海道の34個所の温泉についての熱量を見ますと、VIIはなく、VIが1個所、そしてVが3個所、あとはそれ以下のものであります。その他の日本の温泉では、箱根の大涌谷、早雲山の地域がV、玉川温泉がV、熱海温泉がVI、また地熱地域では松川、九州の大岳がVIといったところですが、VIIは日本にはありません。イエローストン公園のアップガイサベースンや先ほどのニュージーランドのワイラケ

表 2 温泉の熱階級の定義とそれに属する北海道内温泉の数

熱 量 (cal/min)	熱 階 級	北海道内 温 泉 数	%
$0.32 \times 10^7 (10^{6.5})$ 以下	0	7	8.0
$0.32 \times 10^7 \sim 1.0 \times 10^7 (10^7)$	I	42	48.3
$1.0 \times 10^7 \sim 3.2 \times 10^7 (10^{7.5})$	II	16	18.4
$3.2 \times 10^7 \sim 10 \times 10^7 (10^8)$	III	8	9.2
$10 \times 10^7 \sim 31.6 \times 10^7 (10^{8.5})$	IV	8	9.2
$31.6 \times 10^7 \sim 100 \times 10^7 (10^9)$	V	5	5.7
$100 \times 10^7 \sim 316 \times 10^7 (10^{9.5})$	VI	1	1.2
$316 \times 10^7 \sim 1000 \times 10^7 (10^{10})$	VII	0	0.0
		計 87	100

イがVIIであります。このような熱階級がVIとかVIIとかいう温泉を考えてみますと、マグマがまだ融けている時期の温泉で、蒸気として出てくるものですから非常に高温になるわけです。熱伝導の問題としてモデルをつかって計算すると、日本の温泉の90%は地下水が熱せられているものと考えられるようです。図11で下の面をマグマ溜りの上面、上の面を地面とし中間に半径 a、深さ b の円盤状の帯水層が水平に広がっていると、地下水がこれに流入して熱せられると考えます。a や b を大きくして帯水層下面をマグマ溜りに近づけると温泉の温度は高くなり、その熱量も熱階級がVI, VIIともなりうる場合が考えられるのでありまして、温泉の大部分は地下水が熱せられて出来たものと結論出来ると思われま

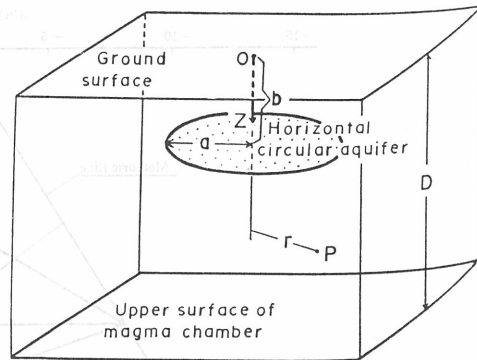


図 11

マグマから出てきた水につきましても現在研究が進められておりますが、一例として先ほど述べました水素の同位元素のトリチウム、これは放射性元素でその半減期は12.3年といわれておりますので、水が長期間地下に潜っていたり、マグマ溜りからの水にはトリチウム濃度は0となります。トリチウムは大気の上空で宇宙線による核反応で出来たものが雨水として降って来たものが起源ですが、その他に核爆発実験などでも生成します。これが地表水に混じるので、浅いところの温泉はトリチウムの含量が多いわけです。アメリカで行われている研究によりますと、温泉の5%以下にはマグマからの水が入っている可能性があると言われておりますが、これについてはまだ今後の問題だと思われる次第です。長い間御静聴有難うございました。