

地震予知研究ノート No.4

佃 為成
(東京大学地震研究所 地震地殻変動観測センター)

2009年1月

目次

		ページ
地震予知の研究体制	佃 為成	2～7
地震研究所の予知研究	佃 為成	8～11
地震研究所改組の経過	佃 為成	12～17
付録：地震研究所改組試案（1992年）	佃 為成	18～25
付録：懇談会議事録（1992年）	佃 為成	26～36
微小地震分布	佃 為成	37
破壊の結合確率モデルと地震の規模別頻度分布	佃 為成	38～57
共存する震源クラスターのサイズと分布間隔の関係	佃 為成	58～62
地鳴り観測		
佃 為成・大橋心耳・山下晃一・菅谷茂樹・酒井真雄・鶴 秀生		63～68
地下からのサインを追って ～ 水・電気・ガス・波	佃 為成	69～80
未来へ繋ぐ ～ たかが水温・されど水温	佃 為成	81～89

地鳴りの観測

佃 為成 (東大地震研究所)・大橋心耳・山下晃一・菅谷茂樹・酒井真雄・鶴
秀生 (日東紡音響エンジニアリング)

Observation of Earthquake Sound

T. Tsukuda (Earthquake Research Institute, Univ. Tokyo), S. Ohashi, K. Yamashita, S. Sugaya, M. Sakai, and H. Tsuru (Nittobo Acoustic Engineering Co., Ltd.)

Abstract

Roaring sounds at the time of an earthquake were sometimes said to precede to shaking. There have been a case people heard only sounds without shaking. Those events happen repeatedly for some time in a certain region. The source of the earthquake sounds should be ground motions due to the earthquake. Then, such small vibrations of the ground as people could not perceive the motion can excite the audible sounds. We want to confirm it by making observation of real earthquake sounds.

Earthquake sounds are considered to be generated by the vibration of ground. An experiment for confirming this was conducted at the site of aftershock region of a strong earthquake of M5.5. We detected tens of earthquakes with audible sounds for human beings. Low frequency particle velocity at the ground surface is transformed into air pressure waves with a constant amplification rate. However, high frequency components greater than 50-60Hz are generated after the disturbance of earthquake motion by the non-linearity phenomena.

§ 1. 序論

大地震に地鳴りが伴うことは昔から知られている。1995年兵庫県南部地震でも、本震の際、揺れを感じない数秒前からゴーという音を聞いたと証言した人が多い。音波より地中を伝わる地震波の方が速度が速いので、地鳴り発生時にはすでに地震波が到達していたはずである。震動の揺れよりも音の方が人間には感じ易かったことを意味する。地震の始まりでは、地面の震動が小さいが、可聴域の音波を生成するような高周波震動があったということの意味している。

大きな地震に伴うものばかりではなく、小規模の群発地震などで、地震とともに鳴動と呼ばれる音が発生する。また、鳴動は聞こえるが、地震としての震動は感じない場合もある。鳴動が頻発したので地震計を設置してみたがいっこうに地震が記録されなかったという話もある。地震には、高周波を多く含んだ地震とそうでない地震が存在するらしい。震源での破壊過程において高周波を発する初期

未来へ繋ぐ ～ たかが水温・されど水温

佃 為成

バトンタッチの精神

一般に、社会における人間一人一人の役割とは、先人のやって来たことを受け継ぎ、それに何かを加えたり、改良しながら次の世代へバトンタッチすることだと思います。考え方や思い、やり方、行為を未来の人々につないで行く、そのいとなみの中に個々の人生があると思います。

地震の研究もその予知の研究も、災害科学や環境科学、自然の法則を解明する研究として、人類が今後、平和で持続的な文明や文化を築いていくための活動の一翼を担っていると考えます。その流れの中で、研究者として、自分は何ができるかを長い間考えてまいりました。やっと一つの答えに行き着きました。これからお話ししたいのは、そのことです。

地震研究所の伝統や遺産

人類の文明の証、遺産としては、建造物の遺構や遺物、美術品や書物があります。一方、「文明」に対比される言葉に「文化」があります。私たちが目にしたり親しんでいる文物、“文明の証”に内蔵されて残っているものは、人々が悩み苦しむ、様々な人間活動の試行錯誤を重ね、紆余曲折を経てたどり着いた「考え方」や「思想」、「精神」だと思います。そのもとで私たちの生活の有り様がまわっていきます。これが文化と言われるものでしょう。

長い歴史の中で残った「思想」や「考え」は大きな宝物（遺産）です。世界の人類の遺産だけではなく、例えば、地震研究所の歴史の中にも貴重な遺産があります。まず、地震研究所の入り口に掲げてある碑文があります。寺田寅彦の文だそうです。彼は、身近な現象を大切にしたい科学を好みました。発光現象にも注目しました。我が国の地球物理学（私たちに身近な地球を探求する学問）の祖でもあります。災害の学問としての地震研究も碑文に書かれています。

大地震が発生したときの地変や被害調査も地震研究所の伝統です。また、物理数学の分野でも、地震予知研究推進の礎を築いてきた伝統が生きています。火山の研究では、電磁気や重力の観測に伝統の香りを感じます。

ただ、地震予知研究のもっとも基礎的な研究分野である地殻変動観測の継続について、少し将来への懸念があります。これまでの観測を継続していかなければ、今までのデータが生きてきません。

これからは、今までの岩盤の歪の観測に加えて、広い意味の地殻変動の観測も重要です。地下深部の流体からの信号も観測することです。予知研究は地震発生

過程の研究に他なりませんから、地震研究の核として、これからの地震研究所に根付くことと思います。

地下からのサイン

地震予知は災害の軽減に役立ちますが、地震研究の上でも、大地震の発生のからくりを解き明かすための重要なテーマです。そのためには、前兆現象をつかまえることが必須です。地下からサインがやってきます。それを読み解くことが大地震の準備過程を知ることにつながります。

大地震が発生するところは地下深く、その場所の様子を探りたいのですが、我々は主に地表でしか観測できません。ボーリングして孔を掘ってみたところで数10kmまで達するのは高温高圧環境下の観測技術の面でも、また経済的にも困難です。

地震波は深部から届きます。これは深部の様子をさぐる最も強力な武器になります。群発地震は地下の応力の強さの情報をもたらします。

地下の流体も流動します。これが、地表付近まで達することがあります。それを掴まえることによって地下深部の情報を得ることができます。最近では、ミュオンやニュートリノなどの高エネルギー素粒子を用いた地球深部探査法も登場してきましたが、流体の微妙な動きを探査できるかどうか。地表付近まで達した流体を直接調べる方法を見逃す手はありません。

ここで注意しなければならないのは、相手の行動は気まぐれということ。こちらの都合にあわせてやって来るものではありません。ランダムという性格をもっていることを認識しないといけません。

異常現象が発生したとき、例えば、井戸の水の温度が49℃になったとします。では、隣の井戸はどうかというと、全く平常のようです。すると、ある研究者は、この事実をとらえて、その異常は信用できないと言うのです。

科学的態度としては、それが信用できるかどうかを検証し、現象の成り立ちを解明するのが正当だと思いますが、鼻から結論を押しつける人がいます。わずか、数mしか離れていない井戸でも現象の現れ方は異なってくるのです。いろいろ経験を積むと理解できるようになります。

異常現象は本当にランダムな現象が多いのです。だからといって、全く役に立たないのかと言うと、そうではありません。現象が発生したということはきちんと確認できます。どこで発生するかわからないけれども、ある地域に密集して発生したり、ある期間に集中的に発生するような場合、統計的な分析をすれば、有用な予測に導くことができます。

一般に地震もランダムに発生します。それでは予測や予知はできないかといいますと、条件付きで、可能です。ランダムといっても、ある地域である期間の地震活動を調べると、だいたい発生率が一定です。地震が多いところは多く、少な

いところは少ないのです。大きな地震の発生頻度が海溝型では 100 年から数 100 年です。前回の地震から何年経っているから次まであと何年くらいだと予想ができます。これは 1 つの予測です。

本当の意味の予知をおこなうには、前兆現象をつかまえる必要があります。それは地下からのサインです。これをもとに差し迫った様子を確率で表現できます（地震予知研究ノート No.1）。予知が予報として実用的な災害予測につながるのです。

何が最も簡単な測定か

地下からのサインのデータの中で、内容が最も単純で測定が最も簡単なものは水温ではないかと思えます。物理量としてはスカラー、温度計でポピュラーなのは白金抵抗の温度依存性を利用するものです。高精度を求める場合は水晶温度計があります。

水温のほかに地温が考えられます。地下の岩盤や堆積層内の岩や土の温度のことです。水温はまず、地温の影響を受けます。自噴せずじっとしている井戸水の温度は、平衡の原理で、その周りの岩盤や土の温度と等しくなります。しかし、井戸水は地下水の流れによって水の流入があり、その影響を受け、地温とずれを生じます。さらに、深部の高温水の侵入があったときは、水温上昇が生じますが、まわりの岩盤の温度の変化は鈍いでしょう。地下からのサインをつかむには、水温を測る方がチャンスが多いということになります。

ただ、熱水上昇が広範囲に及べば岩盤の温度も上昇します。その場合を考慮すると地温を測ることも重要です。ですから、以前、測候所でおこなっていた地温観測を復活させ、アメダスに組み込むことを提案したいと思えます。

測定の簡単さはやはり、水温です。井戸を用い、水温計を投入するだけで済みます。地温計は計器を埋め込むことになります。故障のときは新しく埋め直さなければなりません。

地下水温の意味

私の地下水温についての研究は 1980 年に鳥取県の三朝温泉や湯谷温泉などの観測に遡ります。その後、1990 年のイラン地震（M7.3）の調査に行って体験したことが現在の研究への狭い意味での入り口になりました。

イラン地震はイラン北西部のルドバール市に近いところを震源として発生しました。震源地から、北へ 60 km ほど行ったカスピ海沿岸のデルタ地帯のある町では、地震のとき液状化が起り、水が地下から噴き出しました（地震予知研究 No.2）。水柱は最高 2 m 50 cm に達しました。50 cm ぐらいの深さで一帯が水浸しになりましたが、その水の温度が最初熱かったそうです。何度くらいという質問に

は 50℃という答えが返ってきました。

液状化したところは温泉地ではありません。熱い水が嘘とも思われたいし、日本ではこんな話を聞いたことがありません。

ところが、イラン地震と同じ年に発生した 1990 年 7 月 16 日のフィリピン地震 (M7.6) のときも、液状化に伴って広範囲に熱水が噴き出し、魚が煮えるくらい熱かったと住民が証言したそうです。この場合も熱水は一時的なもので、温泉と直接結びつく証拠はありません。

その頃は、液状化と温水 (熱水) が結びついていました。液状化に伴う発熱を考えていました。摩擦熱です。ところが、エネルギーの勘定をしてみると大変大きな摩擦運動を起こさないと賄えないことがわかります。変だ変だとずっと思っていました。

ところが、2000 年秋、鳥取県西部地震が発生した頃、千葉県習志野市在住の藤原 實という方から自費出版の贈書が送られてきました。その本にはアマチュアの方々が地震予知について調べたり考えたことが紹介されていました。その中に、井戸水がお湯になったという話が短く記載されていました。さっそく、お礼を申し上げるとともに、その詳しい情報を教えていただくよう依頼いたしました。すぐ返事が届き、静岡県焼津市や舞坂町 (現・浜松市)、神戸市などで井戸水の昇温が新聞で報道されていたことがわかりました。液状化地域とは違う所で、また、平常時に水温上昇現象が発生していることが示されたのです。

翌年の 2001 年 3 月、広島県で芸予地震 (M6.4) が発生しました。その地震の前、山口県岩国市の井戸で水温が 49℃になったという話が舞い込んできました。広島観測所では、日頃から地元へ広報 (アウトリーチ) 活動をおこなっていて、芸予地震発生の際も報道機関を通して地震に関する情報提供を呼びかけていました。それに応えて電話の一報が観測所に入ったのです。

岩国の現象については、詳しく観測を行い、地下から熱水 (少量) が時々浅層地下水に混ざる現象であることを突き止めました。さらに、同じような井戸水の温度が上昇する現象は、各地で見つかりました (地震予知研究ノート No.3)。2004 年には静岡県沼津市、神奈川県伊勢原市、福岡県福津市において、井戸水の昇温が発生しました。2007 年には京都府亀岡市で江戸時代から使用している井戸の水が濁るという現象が発生しましたが、その後の水温観測の結果、時々、微小の昇温が発生していることが最近わかりました。

外国でも、1999 年のトルコ地震 (M7.8) の前日にも小川の水温が上昇したという話を聞き、2004 年にトルコを訪れた際、現場に赴いて、証言者に確認をしてきました。

この現象は、地下深部から熱水が上昇してくるのだという仮説を立て、水温については不明な現象 (海底のヘドロの巻き上げ) や岩盤の地温上昇現象 (人工衛星観測) にも適用し共同研究者とともに論文を仕上げました (Tsukuda et al., B.E.R.I., 2005)。地下深部高圧熱水の上昇仮説を 4 件のケースについて検証したものです。高温水混入による浅層地下水温上昇、高圧水の海底噴出、数年にわたる

高温水の混入や活断層地域での高温水上昇による地温上昇などがテーマです。化学成分分析や人工衛星による地温観測データも活用しました。

水が上昇するならば、ガスも同じく地下深部からやってくるはずですが、ラドンガスをマークしてその検出を試みています。2チャンネルのスペクトル帯域の連続記録が可能なガンマ線シンチレーションカウンターを用いて、約8年間に定点観測および自動車や列車での測定を実施し、兵庫県の固定点では、近畿地方の地殻活動異常に対応した2002年頃からのラドン放出量増加、新幹線の測定では、京都付近のラドン放出異常が22%の率で観測されました(Tsukuda T., B.E.R.I., 2008)。

地下深部からやってくる水やガスの検出において、水の場合は水温、ガスの場合はラドンの放射線に注目しています。中でも水温は測定がもっとも簡単で、すぐ実行できる観測項目です。

水温上昇は、深部の高温水の浸入、水温降下は、その高温水浸入の減少を意味します。高温水の動きは、地下深部の応力変化やそれにもなう媒質変化に由来すると考えます。これを仮説としてその検証を続けています。

静岡県焼津市大富小学校内にある静岡県所有の地下水位観測井において2003年から実施している精密水温観測によると1年間に0.02℃ほどの率で水温が現在上昇していることがわかりました。焼津の地下に、深部から高温水が到達していると考えられます。

東海地方ではプレートの固着域での微小地震活動が低下していて、地殻歪の蓄積、応力の増大が進行している可能性があります。そこで、隣の地域、静岡付近ではどうかと考えました。安倍川河口に近い静岡市中島の下水浄化センター内に自噴している井戸があります。安倍川の伏流水や周辺の水系の地下水が高圧のため流れ出ていると考えられます。この水系のどこかに深部の高温水が浸入すれば、わずかながら水温上昇が起こり、精密な観測をすれば、その上昇変化を検出できるのではないかと考えました。

2006年に観測を開始したところ、焼津と同じような水温上昇が記録されました。ただし、ここでは上昇率にムラがあります。しかも、2008年後半では水温は降下に転じました。

東海地域の地下の微妙な動きが次第に見えてきたように思います。

温度とは？

では、温度とは何でしょう。熱と温度はどう違うのでしょうか。お湯に手をつけて熱いと感じたり、氷をさわって冷たいと感じる、その感覚が温度です。熱はエネルギーの姿の一つで、物質の場合にはミクロな粒子がランダムに振動している状態を思い浮かべることができます。電磁波も熱エネルギー（不規則複雑な電気振動エネルギー）をもっています。電磁波一般も物質に放射すれば、物質の熱エ

エネルギーとして感知できます。エネルギーと温度の違いを考えるのにもっとも簡単な題材（ネタ）は、比熱に関するものです。水 1 リットル (1kg) を温度 1 °C だけ高めるには、1 カロリーの熱量（熱エネルギー）が必要です。水の場合は 1 カロリーの熱で温度 1 °C 高められます。

温度と熱エネルギーの関係を考えるもう一つの題材は、ボルツマン定数 k を使うものです。温度（絶対温度） T に k を掛けるとエネルギーになります。統計力学では、物質の系の運動の自由度を考えると 1 自由度あたり $kT/2$ だけのエネルギーを持つとします。単原子の理想気体は $3kT/2$ のエネルギーを持ちます。

ボルツマン定数 k は、エントロピーと同じ次元をもっています。そして、温度は、準静的過程において、エントロピーが増加するにつれて体積一定の系の内部エネルギーがどれくらい増加するかという増加率（微分係数）としても表現できます。

次に、水温に絞って考察しましょう。水温は水温計を用いて測定します。そのセンサーとして白金を採り上げましょう。水に浸された白金は、その水温に馴染むと水温と白金の温度が等しくなります。白金に電気を流し、その抵抗値を測定します。温度が高くなると抵抗値も増加しますから、抵抗変化が温度変化として測定できるのです。

白金と周りの水が平衡状態になって初めて、水温が測定できることになります。水温の急激な変化にはついていけません。例えば、井戸があり、その地下で深部からの高温水が浸入してきたとします。高温水は、周りより比重が小さいので軽く、また拡散するより速く上昇していきます。白金センサーの近傍を通過しますが、高温水の塊が小さく、上昇速度が速ければ、この温度が白金には伝わらないことになります。このようなことが、岩国市の井戸では起こっていたのです。井戸の水の頭に高温水が溜まり、蛇口をひねると熱い水が出てきます。水を流していくと水温は下がるのです。そして、井戸の底に設置してあった水温計には反応しなかったのです。実は、詳しくしらべるとわずかの温度上昇変化は検知していました。その温度変化のグラフを得ることができたのです。このデータは井戸の使用が中止されている期間に記録されました。普段は、井戸ポンプの擾乱のため、細かい水温変化の観測が困難でした。

現在各地で井戸を使って、水温を観測していますが、ほとんどは日常生活に使用されています。ですから、人工的擾乱が大きいデータを取得しています。多くの研究者はこのようなデータの活用を嫌がって敬遠します。

ここで、考えていただきたいのです。この世に、もともと理想的な観測システムは存在しません。大なり小なり、擾乱は付き物です。少しの工夫をすれば、大事な情報を得ることができれば、それは有り難いことではないでしょうか。意味のあるデータを得ることができるか、それを考えるのも研究の 1 つです。

さて、何回も水温の昇温現象を経験すると仮説を立ててみたくなります。次にその話をいたします。

深部流体上昇仮説

プレートの運動やマントル対流の影響により、地殻の岩盤が変形したり岩盤内の応力が強まったり弱まったりした場合、岩盤媒質内の既存の微小な亀裂（クラック）が拡大したり、新たな微小クラックが生成されると考えられます。既存の亀裂内に閉じ込められている流体の圧力に変化が生じ、圧力が強まればその流体を外部へ押しだし、圧力が弱まればその亀裂に外部の流体が流れ込んできます。さらに、拡大した既存の亀裂や新たに生成された亀裂の系は流体の通路としての機能を高めます。

つまり、地殻変動は流体の移動を促進することになります。とくに深部の高圧流体は低圧環境である地殻上部へ移動する傾向をもつはずですが、深部の水は熱水ですから、これが上昇して地表付近に達すれば、浅層地下水に混じり地下水温を上昇させたり、地表付近の岩盤内に留まった熱水は岩盤を熱するでしょう。

そこで、次のような仮説を立てます。

仮説

- 1) 地殻の上部や下部の岩盤には多数の亀裂と間隙があつて、その中に流体が存在する。
- 2) 大地震の準備過程などでは、地殻の変形や応力変化によって各所で局所的な応力集中が発生する。
- 3) 上記 2) に伴って、ある場所では間隙流体圧が高まる（流体信号の発信源）。
- 4) 同時に、微小クラック群の生成、既成クラックの拡大変形も起きる（流体流動の経路）。
- 5) 上記 3) と 4) は、いわゆる“油圧ポンプ”モデルを構成する。
- 6) とくに深部から浅部への流体経路がつくられる。
- 7) 上記 6) の流体経路生成は偶然性に依存し、ある確率（頻度）で実現される。

上の仮説はまだ幼稚なモデルで表現しています。深部と言ってもどのくらいの深さなのか、クラック群の大きさ分布や配列などの実際、ポンプに相当する発信源と流体経路の生成場所の密度や発生頻度などは今の段階では不明です。今後の研究によって、もっと精密化されていきます。

上の仮説の検証については、以下のような方法が考えられます。

- 1) 深部の流体は高温なので、地表付近の水温・地温の上昇を検出します。
- 2) 深部水などが混じった水の化学分析をして、深部流体の存在を確認します。
- 3) 深部高圧水がもたらす異常現象の観察や測定。
- 4) 放出されたガスの測定。とくにラドンが重要です。その場合、放出される放射線を手がかりにします。

地下からもたらされた物質や熱などのエネルギーが、電磁気現象や動物異常、

気象異常現象などの前兆現象の原因になります。その因果関係の検証も重要です。

次に、水温に関係がある熱の問題について少し学問的背景を振り返ってみましょう。

地球熱学再考

熱の問題として、地球物理では 1970 年代にヒートフローの観測が盛んでした。地球の熱史や熱や物質の循環をさぐるため、地下深部から地表へ流れてくる熱量を測ることが要請されて、熱流量（ヒートフロー）の測定が各地でおこなわれ、船を利用して海底の熱流量も測定されました。地震研では上田誠也先生がリーダーで、地球熱学研究部門を率いておられました。

測定量としてエネルギーの流れが重要でした。地下の 2 点の温度差を測り、物質の熱拡散率も測定して、ヒートフロー値を算出しました。

温度そのものはあまり重要ではありませんでした。グローバルなスケールや沈み込み帯ぐらいのリージョナルな地域の平均的なヒートフロー値を求めるのが主な目的でした。

その頃はローカルな現象にはまだ注意が行き届きませんでした。また、時間変化も研究対象ではありませんでした。

現在の時点で問題になるのは、大地震の震源域ぐらいのスケールでの熱の動きです。しかも、熱エネルギーとしては、極めて小さい量が問題です。エネルギーよりも信号としての情報にウェイトを置かねばなりません。熱を運ぶとしても、岩盤を拡散伝導するのではなく、流体に乗って、細いチャンネルを複雑な経路を辿ってやってくる信号なのです。

熱流量のようなエネルギーと直接結びつく量を当面あきらめて、温度そのものの測定に集中します。

重要なことは、測定地点を決めたら、長年に亘る連続観測をおこない、時間変化を詳しく捉えることです。1 回測れば終わりではなく、連続観測が重要です。

地下水温観測研究の継続発展

地下からのサインの中で、地下水の水温変化は情報がしっかりしていることと仮説の検証の主役に成り得る点で最も将来性がある観測項目だと思います。ですから、この観測は、地震研究所でも続けて欲しいのです。

筆者がこの 10 数年で約 30 カ所の観測点を建設しました。その内、極めて貴重なデータが取れ始めている 5 カ所を最重要観測点、次のランクの 5 カ所を重要観測点とし、さらに研究の上ではっきりと成果が今後出るかわからないけれどもできたら止めることなく続けたらよいと考えている 2 カ所の観測点を選びました（地震予知研究ノート No.3）。これら、とくに最重要観測点は続けて欲しいので

す。筆者も定年後も諸般の事情が許す限り観測を続行したいと考えています。

地震予知の研究で、まわりを見渡すと、びっくりするほど温度の観測が欠落しています。そのような観測は、潜在的にもっと行われているのではないかと思った時もありましたが、どこの機関もほとんど手をつけていない。あるいは、観測してもほとんど変化がないということで止めてしまったのかもしれない。

最初から観測を企画することは難しいでしょうが、各地で発見される異常現象に目をとめるならば、原因の解明のための観測を企画することは自然なことです。

水温の観測が出発点となり、電磁伝導度の観測や化学成分や同位体分析による物質的な変化を測定することも自然に広がっていきます。観測点の工夫もさらに発展するでしょう。

井戸でも自噴するような元気のいい水を相手にするとまた、様相が変わってきます。データが豊富になれば、モデリングをやりたくなってきます。

地震研究所にきて、様々なことを学び、それを受け継いできました。さらに、何か新しいものを付け加えて、次の世代に受け渡したいのです。今の私の、精一杯の提案は以上の通りです。