

「地球内部を診断するニュートリノ観測」

東北大学ニュートリノ科学研究センター・教授 井上邦雄

1. 活動的な地球

日常生活では地球は安定かつ恒久的な存在に思え、その内部の活動を意識することは少ないかもしれませんが。実際にはさかんに活動していて、そのことは地震や噴火などで気づかされますし、あたりまえのように存在する地磁気も地球内部の活動によるものです。さらに地球を最も身近な天体ととらえ、その形成・発展までも考えると、人類が生活できる快適な地球環境は奇跡的にも思えてきます。

地球の年齢は約 46 億歳とされ、太陽の誕生と同時期に宇宙の塵が集積してできました。地球表面への集積では、重力エネルギーによる熱が宇宙に放射してしまうため、あまり効率的に温度上昇できません。しかし、塵に含まれる放射性物質が内部から地球全体の昇温を後押ししたことで、数億年かかって鉄が溶ける温度になり、劇的な変化が起きました。溶解した重い鉄が沈み始め、位置エネルギーが解放されます。内部の熱生成のため放熱されず、地球は完全に溶解して重い鉄の沈降がさらに加速します。その結果、鉄を主成分とする重い核と、残った軽いケイ素中心のマントルができました。その後は、地球が冷えてマントルの固化が進むにつれ不純物が押しのけられる形で組成に富んだ地殻が形成されました。核は中心部が固体でその周囲を液体が取り囲んでいます。鉄を主成分とした液体の外核は対流によって地磁気を生み出しています。マントルも固体ですが対流しており、地下深部から物質が上昇しているところ(ブルーム)や逆に沈み込んでいるところもあります。海洋地殻は、海嶺で形成され海溝で沈み込みます。大陸はプレートに乗った状態で移動し、以前はひとつの超大陸だったものが分裂したり合体したりして、現在の姿になりました。地震や噴火もこうした熱の移動に関連した事象の一種にすぎません。

2. 謎の多い地球

さて、さも地球のことは理解できているかのようには書きましたが、実際には謎だらけのようです。例えば、地磁気です。地球の北極はS極で、そのた

め磁石のN極が北を指します。しかし、過去には数十万年単位で何度もN極とS極が反転していたことがわかっています。海嶺では常に地殻が形成され、古い地殻は押し出され新しい地殻がつけ足されます。その部分が丁度テープレコーダーのように、固化するときの地磁気の方向を記録していました。なぜ、地磁気が反転するかは大きな謎のひとつです。また、現在の地磁気は1,000年後には0になるペースで徐々に弱まっていて、地磁気反転が起きつつあるとも考えられます。地磁気は太陽風といわれる放射線の大部分をはじき飛ばして地球を守っています。オーロラはそのごく一部が高緯度地域から進入し、大気と衝突して光を放っているものです。もし地磁気が無くなると、太陽風に直接さらされる地球は、オゾンホールどころではない強烈な紫外線やX線によって、地上の生命を死滅の危機に向かわせるかもしれません。もっとも、計算機シミュレーションによると、反転時に磁気がすっかり無くなるのではなく、磁力線が複雑にうねった状態を経るらしく、とりあえずあまり心配する必要はなさそうでした。ただし、この計算で使用した外核の粘性や電気伝導率は現実の値とは大きく異なり、外核の対流を引き起こすエネルギー源も適当なのだそうです。真の解明にはまだまだ研究を進める必要があります。また、マントルの対流も解明されていません。地球物理的な研究(Geodynamical model)ではマントルは大きく一層の対流をして一様な組成になっていると考えられる人が多く、一方、地球化学的(Geochemical model)には二層対流しているという考えが多いそうです。これは地震波で測定したマントルの密度分布で急激に密度が変化するところがあるためで、地球物理学者の多くは、同一組成のものが高温・高圧で相転移していることによる密度変化と考え、地球化学者の多くは、そもそも組成が異なると考えているそうです。最近の高温・高圧実験の進展では、上部マントルと同じ組成では下部マントルの密度は作り出せないというデータも出ていますが、決着はまだのようです。

3. 地球の組成

地球科学には5つの大問題があるといわれています。(1)カリウムとウランの比、(2)地熱への放射能の寄与、(3)マントルの構造分布、(4)核内の放射性物質、(5)核・マントル境界の性質、の5つです。実は地球の謎の多くは、地球内部の組成がはっきりしないこと、それに関連して地球の動的性質を決定づける地球内部での熱生成が解明できていないことに起因しています。現状では、地球と太陽は同じ塵が元になっていると考えられており、太陽表面に残存する物質の主要成分比と地球で採取した多様な隕石を比較し、太陽表面の組成に近いものを選び出すことで、炭素を多く含むC1コンドライトが地球の始原隕石の有力候補とされています。このC1コンドライトを詳細に分析することで、主要でない元素の成分比も知ることができます。始原物質を決めれば、当初の話のように鉄を主成分とする核と、ケイ素を主成分とするマントルに分化し、その他の元素は、揮発性や、鉄と岩石のどちらを好むかで宇宙空間への霧散やそれぞれの層への局在を推定できます。ただし、宇宙化学的(Cosmochemical)な考察では別種のエンスタタイトコンドライトが始原物質の候補であり、異なる組成をもたらします。

4. 地球内部の放射性物質

さて、ウランやトリウムなどの熱を発する放射性元素はマイナーな元素ですが、隕石の分析から地球内の総量を推定し、さらに鉄との親和性などから核・マントル・地殻にそれぞれどの程度含まれるかを推定します。特に地殻は測定することも可能です。その推定では核にはウラン・トリウムなどの放射性元素は含まれておらず、マントルと地殻にほぼ半分ずつ含まれます。ウラン・トリウムは崩壊を繰り返し最後は鉛になりますが、この過程で熱を生じ、地球全体の放射性崩壊起源の総発熱量は20TW(Tはテラで 10^{12})程度(誤差も考えると9~36TW)と見積もられます。原子炉1基での発熱量は3GW(Gはギガで 10^9)程度で、世界中の原子炉の総発熱量も1TW程度ですから、地熱量のすさまじさがわかります。ウラン238の半減期は45億年、現在は0.7%しかないウラン235の半減期が7億年という事から逆算すれば、地球形成時の放射性発熱量を知ることができます。一方で地球表面の多くの場所で温度勾

配を測定し、補間や補外をすることで積算される地球の総放熱量は 47 ± 2 TWにもなります。この膨大な放熱量にかかわらず地球がなぜ冷えていないのかは、19世紀から20世紀にかけての大きな謎で、ケルビン卿が惑星の熱伝導の観点から地球年齢は1億歳以下だと主張すれば、ダーウィンが生物学的観点から10億年以上だと主張するなど、大混乱でした。20世紀初頭になってやっと、ラザフォードが放射性熱という新しい概念を導入してこの論争を終息させました。最近の推定では、地球は $47 - 20 = 27$ TW程度で冷えていることになります。47TWの内訳は、地殻内の放射性熱8TW、マントル内の放射性熱12TW、マントルの冷却18TW、核の冷却9TW、潮汐力等0.4TWと推定されています。ちなみに太陽が地球に照射している光エネルギーは約170PW(Pはペタで 10^{15})もありますが、これらはそのまま宇宙に放熱されています。

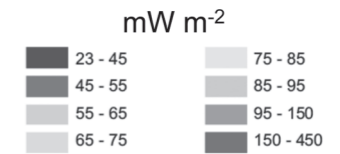
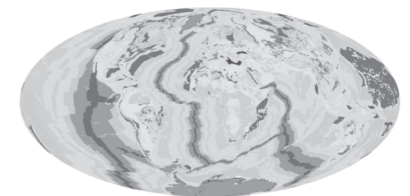


図1 地表の熱流量

5. 地球内部起源ニュートリノ

さて、核からマントルへの熱の移動が地磁気を生成し、マントルから地殻への熱の移動が、ブルームテクトニクスやプレートテクトニクス、最終的には地震や火山噴火などにつながります。地球活動を理解する上で非常に重要なこの地熱生成量を直接的に調べることはできないのでしょうか。そこで活躍するのがニュートリノです。ウラン・トリウムなどは、放射性壊変を繰り返す中で熱とともに反ニュートリノを放出します。例えば、 ^{238}U は8回の α 崩壊と6回の β 崩壊によって51.7MeVの熱と6つの反ニュートリノを生成し ^{206}Pb に変化します。天然ウラン1kg当たりでは、98.5 μW の熱出力とともに毎秒 76.4×10^6 個の反ニュートリノを放出します。

少しニュートリノの説明をしましょう。ニュートリノは物質を構成する素粒子の一種で、身近な電子と比べても10桁も多く宇宙に存在します。ニュートリノは電荷を持たず非常に軽いため、ほとんど衝突することなく自由に宇宙を飛び交います。また、反応時に生じる粒子と関連付けて電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの3種類存在し、さらに反物質の元となる反粒子に属する反ニュートリノも考えると、計6種類あります。これらは素粒子の性質としての区別ですが、生成される場所と呼ぶこともあります。例えば、原子炉で作られるニュートリノは原子炉ニュートリノと呼ばれますが、素粒子の性質としては反電子ニュートリノです。太陽ニュートリノ、地球ニュートリノ、超新星ニュートリノはそれぞれ太陽、地球、超新星が放出するニュートリノです。地球ニュートリノは反電子ニュートリノが主成分です。最初に実験的に観測されたのは原子炉ニュートリノですが、これを止めるには、水なら20光年程度必要です。

反ニュートリノは地球でも簡単に貫通するので、その量を測れたならば、地球内のウラン・トリウム量の量、ひいては放射性発熱量を知ることができます。また、それらの分布がわかれば、性質の似た元素の分布に対しても知見が得られます。ニュートリノの初観測からまもない1960年代には、既に地球ニュートリノ観測のアイデアが議論されていましたが、当時の技術では観測装置の実現は不可能でした。実際の所、もし観測できたとしてもニュートリノ振動を知らない当時の知識では、放射性熱を約半分程度に見積もってしまったことでしょう。

6. ついに実現した地球ニュートリノ観測

地球ニュートリノ観測を初めて実現したのはカムランド(図2)で、2005年のことです。原子炉ニュートリノ振動の観測で、(反)ニュートリノがどのように伝搬するのかを解明し、同じ観測手法で地球ニュートリノの観測に成功しました。40年も

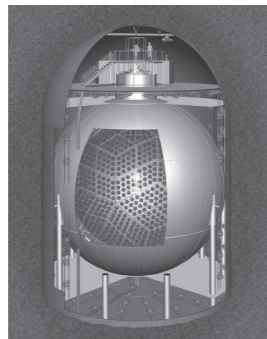


図2 カムランド反ニュートリノ観測装置

前からの夢を実現し、地球内部を直接観察する新たな目を獲得したわけです。そしてその目は、先に挙げた地球物理の5つの大問題全てを解く鍵になっています。ただし、観測そのものはかなり大変です。1,000トンの液体シンチレータを有するカムランドのような巨大な装置でも、地球ニュートリノの反応数は月に1回程度です。さらに、ニュートリノ振動を解明する上で重要だった原子炉ニュートリノは、地球ニュートリノと同種のニュートリノであり観測の妨げになります。現在のところ、地球ニュートリノと原子炉ニュートリノを区別するには、それぞれ異なる特徴的なエネルギースペクトル(地球ニュートリノのほうが平均的なエネルギーが低い)と、原子炉の運転と相関があるかという時間情報を使います。現在のように国内の原子炉がほとんど停止している状態は、地球反ニュートリノ観測に適しています。最新結果では、2002年3月から2012年11月までのデータを使用していますが、バックグラウンドとしての原子炉反ニュートリノが原子炉の停止に呼応して大きく減少していることが見て取れます(図3)。10年強にわたる観測では、 116 ± 28 事象を蓄積できました。十分な事象数があればエネルギースペクトルからウラン・トリウムを分離して測定できるのですが、ここでは理論値 $\text{Th}/\text{U} = 3.9$ を仮定しています。反ニュートリノ流量に換算すると、 $6.2 \pm 1.5 \times 10^6/\text{cm}^2/\text{sec}$ (反電子ニュートリノでは 3.4 ± 0.8) となります。

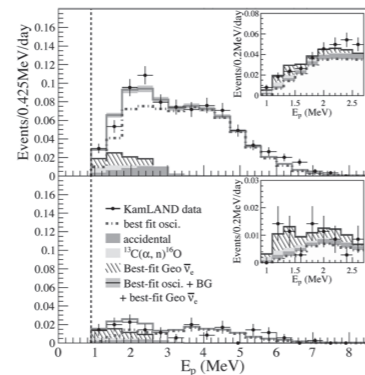


図3 反ニュートリノスペクトル、原子炉稼働時(上)と原子炉停止時(下)

7. 地球ニュートリノ観測からわかる事

この観測結果から、例えば47TWの地球の放熱量全てが放射性熱であるとするモデルは排除できます。さらに、地球運動学的(Geodynamical)モデル

よりは地球化学的(Geochemical)モデルあるいは宇宙化学的(Cosmochemical)モデルを好むこともわかります(図4)。件の論争では、地球化学者のモデルの方がもっともらしいようですが、始原隕石の決着はまだつけられません。地球ニュートリノ観測が地球モデルを選別できるようになったことは大きな進展です。地球ニュートリノ流量から放射性熱量への換算は、一筋縄ではいきません。現在の測定方法では地球ニュートリノがどこから来ているかわからないので、大まかに2つの仮定を経て熱量に換算します。まず、地殻の放射性熱は岩石の分析結果を利用し、さらにマイナーな元素は隕石の分析を利用する。次に、マントルの組成は一樣と仮定する。つまり、地球ニュートリノ流量の測定をマントル内のウラン・トリウム量に換算する作業を行います。その結果、地球全体での放射性熱生成として22TWを得ることができ、地球科学の5大問題のひとつを解決したことに相当します。また、地球の総放熱量47TWからニュートリノで測定した放射性熱生成を差し引いた残り25~38TWは、地球形成時に核とマントルが分離したときに生じた大量の熱を現在も放出し続けていることを示しています。

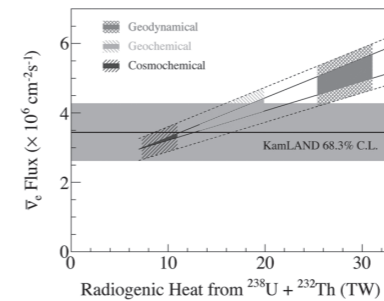


図4 地球ニュートリノ観測結果と地球モデル

8. ニュートリノ観測の今後

これまでの地球反ニュートリノ観測は、カムランドでの116事象とイタリアでの14事象があります。この新手法には多くの研究者が関心を寄せており、カナダ・フィンランド・ハワイなどで新しいプロジェクトが提案されています。特にハワイが計画するプロジェクトは1万トンの観測装置を船で運び海底に沈めて測定するというもので、原子炉から離れることができ、海洋地殻は薄く寄与が小さいため、より詳細なマントルの情報が得られ、さらに複数地点に移動して観測ができるという特徴があります。一方、

カムランドでは、反ニュートリノの反応で生じる中性子を利用した、方向感度を持つ反ニュートリノ観測装置の開発を行っています。

9. 地震・噴火の予知?

地球内部を調べる新たな手法が誕生したとはいえ、これが地震・噴火の予知につながるかというと、そんなに単純ではないでしょう。プレートにどれだけ歪みが蓄積しているのか、マグマがどの程度溜まっているのかを知らなければ予知にはなりません。特に地震に関しては今のところ深部の歪みを知る術がなく、多様な手法を組み合わせた長期的な観測から一步一步理解を進めていくしかないように思います。一方、噴火に対してはマグマの蓄積を直接観測することが可能かもしれません。宇宙線の減衰からマグマだまりの観測に成功したという報告もあります。同様にマグマの蓄積がニュートリノ量に変化をもたらす可能性があります。ニュートリノは広範囲の変化をとらえることができるので、大規模なマグマの変化を観測できる可能性があります。人類の歴史の中でも大規模な噴火によって町や広い地域が壊滅したことが幾度となくありましたが、このような巨大な噴火に対して予知的な情報を提供できる日がくるかもしれません。

10. さいごに

カムランドはニュートリノ振動を研究する目的で作られましたが、同時にニュートリノ地球物理という新しい分野を創出することにも成功しました。現在はさらに極低放射能環境を活用した多様な研究が進行しています。こういった基礎研究は一朝一夕に産業や応用に結びつくものではありませんが、基礎研究なしに将来の発展は見込めません。将来の地震・噴火の予知を夢見て、あるいは真理の究明といった純粋な知的好奇心を動機にして、基礎研究を続けることは人類だけに許された特権だと思います。今後も若い知性が加わり基礎科学が発展し続けることを期待します。

参考になるホームページ

カムランド: <http://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland/>
最新結果: 上記 + ResearchResults/results_1303.4667_j.html