

日本測地学会 公開講座

# 地球と宇宙を測る測地学



開催日：2019 年 10 月 28 日(月)

会場：富山国際会議場 2 階

後援：富山市 主催：日本測地学会



**日本測地学会**  
The Geodetic Society of Japan



# 測地学と立山隆起～構造とダイナミクス～

川崎一朗

(公) 東濃地震科学研究所研究員・富山県立大学客員教授・京都大学名誉教授

## 1. 立山黒部アルペンルートを東西に横断する地殻構造（地震学）

1989年夏、北大の勝俣(1996)は、大町市から大山町（現在は富山市）本宮までほぼ40 kmに3 kmから4 km間隔で11台の地震計を置き、立山・黒部アルペンルート直下を通ってくる地震波の観測を行った。求められた地殻構造モデルは、大町市扇沢から称名の滝辺りまでほぼ15 kmの深度1.5 kmから4 kmに水平なレンズ状の「熱水岩石混合層」が分布するという衝撃的なものであった。

1991年秋、爆破地震動研究グループによって、群馬県東吾妻町（当時は吾妻町）から、通り、石川県金沢市まで、約180 kmの人工地震観測が行われ、立山・黒部アルペンルートを東西に横断する地殻構造モデルが求められた（酒井・他，1996；Takeda et al., 2004）。

1996年7月から10月まで3ヶ月、中部山岳合同

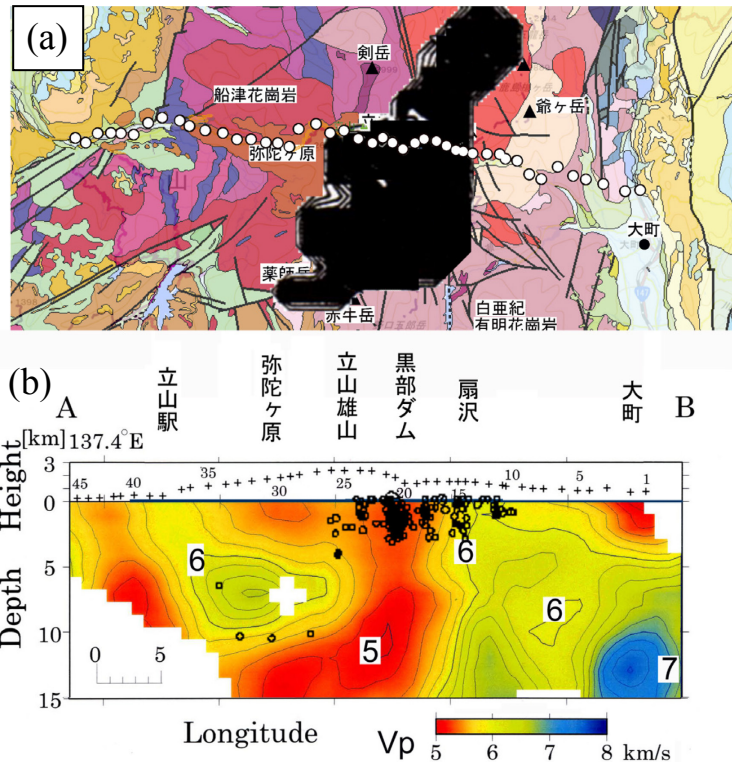


図 1 (a) は、産総研の地質図ナビの地質図に源内・他 (2002)の超低密度体の深度 3 km ～ 4 km を重ねたもの。未発表資料。(b) は、Matsubara et al. (2000)によるP波速度の揺らぎの断面図の 15 km 以浅の部分に東北地震後 1 年間の群発地震（北緯 36.45 度から 36.6 度，M2 以上。東大地震研のTSEISによる）をプロットしたもの。図中の数字はP波速度（km/s）。

地震観測が行われた。東大地震研と富大理学部は、アルペンルートに沿って立山町千垣から大町市まで東西50 kmにほぼ1 km間隔で45台の地震計を並べ（図1 (a) の○線）臨時観測を行った。

人工地震探査と合同地震観測のデータの解析から、Matsubara et al. (2000) は図1 (b) のようなP波速度の揺らぎの断面図を求めた。それによると、深度15 kmから10 km程度から黒部湖直下まで、マグマの上昇経路が存在する。

## 2. 重力異常による超低密度域（測地学）

1984年夏、金大の河野（1938-2010）は、大学院生とともに、約10日かけて、立山、薬師岳、三又蓮華岳、槍ヶ岳、穂高岳などの脊梁部の重力観測を行った。その貴重な観測データを核として、源内・河野・平松(2002)は、黒部峡谷直下の超低密度域分布（図1(a) の黒で塗りつぶした範囲）を求めた。密度は $2.1 \text{ gr/cm}^3$ で、深度は2 km程から6 km程までである。

## 3. 自己閉塞層（火山学・熱水地球化学）

互いに多少の食い違いはあるが、以上の地殻構造や低密度体の研究成果を総合して、立山・黒部直下の「熱水岩石混合層」の存在が明確になった。上端は深度2 kmから3 km、下端ははっきりしないが6 km程度、その下がマグマ（溶融した岩石）である。この全体を、ここでは「立山・黒部マグマ溜まり」と呼ぶ。

「山体の荷重のため熱水は地表に押し出されてしまうのではないか？」という疑問に対して Kusakabe et al.(2003)は次のような答えを示した。地表から地下水が浸透しつつ温度が上がると、溶液中にシリカが溶け込む。温度が350℃から550℃の熱水中では石英の溶解度が温度の上昇とともに低下する（Bodnar and Costain, 1991）。シリカを溶かし込んだ地下水がマグマに近づき、この溶解度の逆転領域に入ると、溶解度の低下により石英が沈殿し逆転領域の岩石の空隙を閉塞させる。この自己閉塞層（黒部峡谷で深度2kmから3km）が熱水を閉じ込めていると考えられる。

#### 4. 80万年前の若い花崗岩（地質学）

伊藤・他（2013）によれば，阿曾原で80万年前，扇沢で100万年前の年代を示す黒部川花崗岩が発見された。花崗岩は深度5 km程度で固結したもので，単純に考えれば，これらの花崗岩体は400 m/10万年から600 m/10万年程の速度で上昇してきたことになる。

#### 5. 高位段丘の高速隆起（活構造学／活断層学）

富山平野の東縁には十二貫野（黒部川左岸）や東福寺野（早月川左岸）などの標高100mを越える高位段丘が分布する。中村(2005)は被覆土壌層の広域テフラから段丘面の離水時期を，十二貫野は18万年前から14万年前，東福寺野は20万年前から16万年前と求めた。

発表者の計算では，氷期の海水準を深度60 m程度と仮定し，活断層の長期評価に基づく魚津断層による累積地震性地殻変動25 m/10万年程を差し引くと，十二貫野は115 m/10万年程，東福寺野は155 m/10万年程の定常的地殻変動として高速隆起してきたことになる。

#### 6. アルペンルートGPS（測地学）

富大の竹内のグループは浄土平における繰り返しGPS観測によって，1996年から2004年までの9年間に，富山観測点を基準として，浄土平が3.8 mm/年程の速度で隆起していることを示した（道家・他，2008）。

西村・穂高岳測量班(2012)は，GEONET観測網のデータによって，2005年から2010年の間，立山黒部アルペンルート沿いでは，大山（栗巣野）では0 mm/年程，室堂と扇沢（大町）で3 mmから4 mm/年の隆起，それ以東の糸静線周辺は沈降であることを示した。それは，+2 mm/年のゲタを履かせると道家・他(2008)の結果と良く似る。このゲタは，村上・小沢(2004)が示したこの時期の広域的だが一時的な地殻変動の変化と思われる。

以上を10万年に換算すると，現在，大山（栗巣野）は250 m/10万年程，室堂

や扇沢は500 m/10万年程の速度で上昇していることになる。

## 7. 2011年誘発群発地震（地震学）

2011年3月11日14時47分頃、M9東北地震による巨大地震波が群発地震を誘発して立山・黒部の構造とダイナミクスに2つの貴重なヒントをもたらした。図1 (b) の様に、「群発地震分布の中心はマグマ上昇部直上の黒部峡谷」，「深度分布の下端は2 km程で、従って熱水岩石混合層の上端は2 kmから3 km」であることを示したのである。

## 8. 結論

以上を総合すれば、過去数10万年の広域的な立山隆起の一翼として、立山・黒部マグマ溜まりの直上である黒部峡谷を中軸として、500 m/10万年を越える高速隆起が現在も進行していると考えることができる。とは言え、本来、数10万年と数10年の地殻変動を同列に論ずることは無謀である。そのギャップを可能な限り埋めるためにも、弥陀ヶ原火山の噴火問題とのリンクを可能にするためにも、諸分野の研究の一層の発展が不可欠である。

# 神岡の地下から挑む地球と宇宙の観測

新谷昌人 東京大学地震研究所

地上に比べて地下環境は静穏で安定しており、精密な観測研究に適しています。そのメリットを活かして、神岡地下施設（東大宇宙線研、岐阜県飛騨市）では地球の内部そして宇宙の天体現象を観測するための2つの装置が稼働を始めました。地球と宇宙というと、全く異なる対象でまさに天と地の差があると思われるかもしれませんが、神岡で連携して取り組んでいるのはいくつか理由があります。

もともと自然科学の研究者は、対象は違えども自然のしくみを理解しようと研究をしています。大まかに表現にすると、研究対象が現在どのような状況になっているか、根本原理は何か、将来どうなるのか、ということをはっきりさせるのが研究テーマになります。おそらく、この順番で次々明らかになっていくのが理想でしょう。地球科学の場合は、地球の構造がどのようになっており、地震や火山活動など様々な変動がどのように起こるのか、それらの原因やメカニズムはどのようになっているのか、将来はどうなるのか、ということになります。

宇宙の研究の場合は、スケールが大きくなり、いまの宇宙の状態とともに、その始まりから終わり(?)までにとどまらず、さらに別の宇宙についても考えている研究者もいます。宇宙の研究をする上での根本原理としては一般相対論が用いられています。われわれは地球から宇宙のさまざまな現象を観測していますが、それらで一般相対論と明確に矛盾する事象はいまのところ確認されていません（もちろん、観測精度などの限界で確定できていないものはあります）。

神岡で KAGRA グループが行っている研究は、一般相対論から導かれる重力波の研究とそれを用いた宇宙の観測です。重力波は 2016 年にアメリカの LIGO グループが観測に初めて成功しました。一般相対論から計算される波形とほぼ同じ重力の波が宇宙の彼方からやってきたということが示されました。一般相対論が正しいということがより高い精度でわかっただけでなく、この重力波を用いると、ブラックホールなど従来の望遠鏡で十分に観測できなかった天体からの情報が得られ、現在の宇宙の理解とともに過去から将来の宇宙についての研究が急速に進められるでしょう。そのためには、LIGO の装置だけでは不足で、



KAGRA は LIGO やヨーロッパの VIRGO グループの装置とともに地球規模の観測ネットワークを構成し、詳細な重力波の性質の解明や重力波による宇宙の観測に寄与することが期待されます。

KAGRA の装置は最大限の性能を発揮するために、総延長 6 km の大型装置となっていて、静穏な地下環境に設置されています。また、使用される鏡を低温にして熱のノイズを低減させることが特徴になっています。これまで試験観測が何度か行われ 2019 年の本観測へむけて最終的な準備段階に入っています。

大型装置は岩盤のわずかな動きにも影響を受けやすいため、KAGRA には精密に岩盤の動きを観測する 1.5 km のレーザー伸縮計が設置されました。それを用いると KAGRA への岩盤の影響を補正し安定した観測につなげることができます。一方、岩盤の動きそのものは地球科学の研究にも利用できます。神岡の伸縮計は地震計では観測できないゆっくりとした地面の動きを高い精度で捉えることができます。この伸縮計は 2016 年に観測を開始しました。図 1 は伸縮計の建設中の様子です。直径 1 m の真空容器の中に鏡を設置し、レーザーの光を 1500 m のパイプの中を通して鏡で反射させ、光の波の干渉という性質を使って地面の動きを測ります。じつは、重力波検出器もこの光の干渉を使った装置です。この方法は光の波の波長（約千分の一ミリメートルあるいはそれ以下）を単位としてそれよりさらに細かく測定できるので、重力波の場合は天体からの重力波によって動く微妙な鏡の動きを、伸縮計の場合は地面の伸縮による鏡の動きをそれぞれ高い精度で測ることができます。

図 2 は伸縮計で記録された 2 日間の地面の伸縮データです。月や太陽の引力による地球の約 1 日周期の変形（地球潮汐）が見られます。潮の満ち干の潮汐はなじみがありますが、海水と同時に地球そのものも引力により変形し、このよう

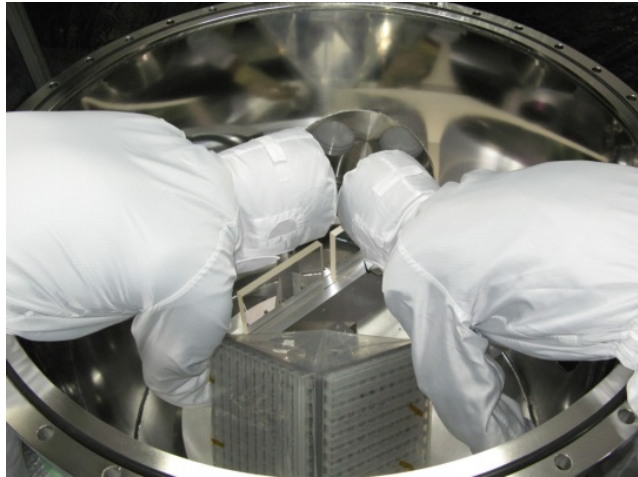


図 1 伸縮計の建設中の様子。貼り合わせの特殊な鏡（中央下部。反射面は奥側）を直径 1m の真空容器内に設置しました。装置内に異物が入らないようにクリーンスーツを着用して作業を行います。



に地面が伸び縮みします。このとき地震が起こるとそれも重なって記録されます。このようないくつかの地震を観測し、地震の断層運動に伴う地殻変動が神岡より数百 km 離れた震源の地震についても観測できることがわかりました。地震がどのように起こったか、これまで（地震計）と別の方法（伸縮計）で明瞭にわかるようになりました。

このように精度の高い装置なら、ひょっとしたら地震の予兆のようなものも捉えられているのではないか、と思われるかもしれません。しかし、いまのところそのようなものは見

えていません。一つの理由は、装置の近くで偶然に地震が起こらないと測ることはできず、それは予兆があったとしても地震後の変動よりもはるかに小さいと考えられるからです。つまり、装置のごく近くで地震が沢山起こればいろいろなデータから地震の性質がわかるようになるはずで、地震が起こる「基本原理」が見つかるかもしれません。残念ながら多くの地震は装置の設置されている深さよりもはるかに深い地中で起こり、大きい地震ほど頻度は低いのでなかなか理想的な記録が取れません。地震研究の難しい部分の一つです。それでも神岡の静穏で安定した地下環境で高精度の装置を用いて観測することによって、これまで捉えられなかった地殻変動が見えてきました。KAGRA の装置も設計された性能で重力波が観測されるでしょう。今後の地球と宇宙の観測で何が見えてくるのか、期待しつつ研究に取り組んでいきます。

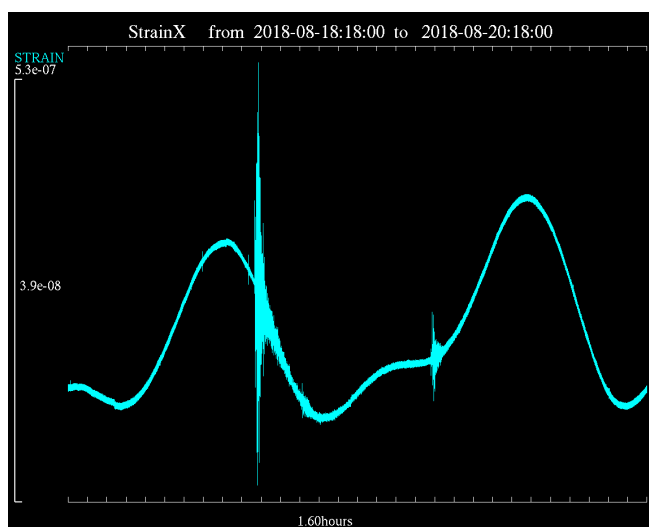


図2 レーザー伸縮計で記録された神岡における2日間の地面の伸縮の記録。2018年8月19日に起こったフィジー諸島の地震（M8.2、左の大きい振幅）とインドネシアの地震（M6.9、右側の小さい振幅）の波形が明瞭に見えます。約1日周期の波は地球潮汐（月や太陽の引力による地球の伸縮）で、1500 m の距離が 0.03 mm 程度変化します。



図3 レーザー光の干渉によって生じた縞模様(左)と KAGRA 坑道の入口(右)





**日本測地学会**  
The Geodetic Society of Japan