

火山活動に伴う大気音波の発生と伝播を固体・大気音響結合系として理解するため、京都大学防災研究所と共同で諏訪之瀬島と桜島にマイクロフォンを設置して継続して観測をおこなった。また、火山噴火予知センターと共同して2011年1月に始まった霧島新燃岳火山噴火を広帯域圧力計を用いて継続して観測をおこなった。伊豆大島島内での広帯域圧力計設置整備を継続した。

### (3) 海溝付近における熱輸送過程の観測的研究

海洋プレートが沈み込む場である海溝の周辺地域において、地下からの熱放出量(熱流量)を測定することにより、間隙流体や堆積物の流動による熱輸送、それがプレート境界面の温度構造に与える影響について研究を行っている。

南海トラフ海域では、海溝軸付近(トラフ底)における熱流量が東西方向に大きく変化し、特に四国東部・室戸沖では沈み込むプレートの年齢に比べて異常に高いことが知られている。この異常高熱流量の原因を調べ、巨大地震発生帯の温度構造への影響を明らかにすることを目的とし、紀伊半島南方のトラフ底において詳細な熱流量測定を実施した。その結果、東経136度付近に熱流量分布の明瞭な境界があり、その西では室戸沖と同様の高熱流量を示すことが明らかになった。この境界は沈み込む海洋地殻の構造が変化する境界に近く、構造の違いが地殻内の間隙流体の流れに影響し、温度構造の変化をもたらしている可能性がある。これを検証するために、室戸沖の西側(四国南方)においても熱流量分布を詳細に調べる予定である。また、海洋地殻内の流体流動による熱輸送について、東西方向の構造変化を考慮したモデル計算を進めている。

日本海溝海域では、これまでの調査により、三陸沖の海溝海側斜面からアウターライズにかけて、太平洋プレートの年齢に比べて高い熱流量が観測されることが判明している。高熱流量を示すのは海溝軸から約150kmの範囲であり、異常はプレート沈み込みと密接に関連すると考えられる。この異常の原因としても、海洋地殻内での間隙流体流動による熱輸送が有力であり、数値計算による評価を行った。その結果、沈み込みに伴うプレートの曲がりによって海洋地殻が破碎され、透水性の高い層の厚さが海溝に向かって増していくとすると、観測値が説明できることが示された。今後、このモデルを検証するために海溝近傍で新たな観測調査を行い、熱流量異常と巨大地震震源域の温度構造の関係を解明することを目指している。

## 3.8 高エネルギー素粒子地球物理学研究センター

教授	相原博昭(兼任), 大久保修平(センター長), Yu Jinhai(客員長期, 中国科学院)
准教授	田中宏幸
助教	武多昭道
特任研究員	保科琴代, 宮本成悟
大学院生	西山竜一(D1), 草茅太郎(M2), 仲達大輔(M1)

本センターの設置目的は、宇宙線ミュオンやニュートリノ等の高エネルギー素粒子を用いて、これまでにない高い分解能(10-100m程度)で断層や火山などの固体地球内部を透視し、地震・火山現象の解明と防災・減災に貢献することである。そのためには素粒子透視技術(ラジオグラフィー)の一層の高度化が必要となる。とくに素粒子検出デバイス開発に対しては、小型・軽量・低消費電力という野外観測からの要求に応えつつ、一方で空間的にも時間的にも高い解像度を確保することが、世界の中でのリーディング・エッジを今後も確保することが欠かせない。また、一方でこれまでは火山に限定されてきた応用分野を、地震断層等にも広げていくことが望まれてきた。これらのことを念頭に、当センターで進めてきた研究活動を以下に述べる。

### 3.8.1 素粒子検出デバイスの開発研究

#### (a) 深部のミュオンラジオグラフィーを目指したカロリメータ開発

ミュオンラジオグラフィーの誤差要因の一つに、鉛直方向からの電磁シャワーに起因する偽イベントをミュオンの飛来と誤認することがあげられる。バックグラウンド雑音(BG)と呼ばれるこの現象を軽減するために、4層の位置敏感型ミュオン検出器面からなるカロリメータ方式の検出器を2011年に開発し、北海道明治新山潜在ドームをターゲットにした検証実験を、北海道大学と共同で行ったが、活動的火山のイメージングにはBGの削減率が不足していることも判明した。この問題を克服するために、2012年度は以下の開発項目からなる新型カロリメータを開発した。

- (1) カロリメータ架台の改造
- (2) データ収集ハードウェアの新規開発
- (3) リモートVPNの利用による装置のオンラインモニタリング
- (4) 自動解析アルゴリズムの発明とその試験
- (5) 有珠山の観測とその内部構造の解明

まず、ミュオン検出器面の総数を7層にすることで、一層のBG削減を図った。そのために4層用に設計されたカロリメータ架台を改造して最大8層まで対応できるようにした。2011年までは2008年に開発された小型データ処理ボードを使い、層ごとにコンピューターを用いてソフトウェア的に処理をすることで対応することが出来たが、7層としたことで、データ処理量が増加したため、従来方式では処理不能となった。この問題を多チャンネル同時処理ハードウェアを開発することで解決した。処理されたデータは自動的にzipファイルに圧縮され、VPNルータを介して、地震研究所からリアルタイムにモニタリングが可能である。宇宙線ミュオンスペクトルの高エネルギー成分だけを用いて解析する方法を原理とした自動解析アルゴリズムの発明を行い、2012年1月27日に特許を出願した。①このアルゴリズムの有用性の確認、②新型カロリメータの実効性の確認、そして③有珠山のドーム成因を論ずることを目的として、2012年10月から2ヶ月間、有珠山の観測を行った。その結果、厚さ1.5 kmまでの山体において、現実的な観測時間(~2ヶ月)で密度構造を精度良く求めることが出来ることが確認された。また、有珠新山の隆起、およびその地域での断層形成につながる貫入マグマをイメージングできた。この新型カロリメータ検出器の開発により、活動的火山へのアプローチが可能となった。

#### (b) 多湿水平坑道内でのミュオグラフィ測定装置の開発

一端が閉じている水平坑道では、坑道入口から100 m以上奥に入ると、通気性の問題により湿度がほぼ100%となる。実際にミュオン測定器を、水平坑入口から350 m進んだ地点に設置したところ、そこでは湿度は常に97%以上を示しており、一日で測定器表面に結露が生じた。そこで、このような常時多湿環境でも観測可能な、耐湿ミュオン検出器システムを開発した。これは、ソーラーパネルで駆動可能なMu-CAT(Muon Computational Axial Tomography)システムに採用されているCockcroft-Walton回路を組み込んだ光電子増倍管(CW-PMT)と除湿ハウジングとミュオン・リードアウトモジュールを組み合わせたものである。開発した耐湿ミュオン検出器システムを2012年8月に前述の水平坑内に設置し、試験観測を行った。観測開始以降、落雷によるミュオン・リードアウトモジュールの故障があったものの、それを除けば2012年末まで安定的に稼動しており、現在でもミュオン測定が行われている。本測定で多湿水平坑内でのミュオグラフィ測定装置の実効性が実証された。

#### (c) ボアホール設置型ラジオグラフィ

宇宙線ミュオンは上空からのみ飛来する。従って、断層破碎帯や地滑り面等、地下にある構造物を透視するためには、測定対象を見上げるように、ミュオン検出器を地下深く掘削坑(ボアホール)等に埋設することが必要となる。ボアホールのような狭隘な空間では、ミュオン・フラックスは限られた量しか得られないので、それを有効に活用する観測技術の開発が不可欠となる。今年度は直方体型シンチレーターストリップを2チャンネル組み合わせた耐水型検出器を製作し、それを実際のボアホールに挿入して、深度と透過ミュオン強度の関係から、周囲の地盤密度を求めることに成功した。また、得られた地盤密度は、過去の掘削調査結果とよく一致した。今後は、地下の空洞や活断層の観測を行い、本測定手法を確立する予定である。

### 3.8.2 ラジオグラフィ解析による研究

#### (a) ミュオンによる火山体内部のイメージング

観測中もしくは観測に着手した火山としては、有珠山、昭和新山、浅間山、桜島火山、雲仙普賢岳、ストロンボリ火山及びカナリア諸島がある。有珠山の溶岩ドーム成因を論ずることを目的として、有珠山北麓の北海道大学有珠火山観測所洞爺分室に、1(a)で述べた新型カロリメータ検出器を設置し、北海道大学と共同で測定を行った。測定期間は2012年10月及び11月のそれぞれ1ヶ月間である。測定期間が二部に分かれているのは、回転架台を持つ新型カロリメータの特長を活かして、視野角を増やすためである。また、回転させることで、部品に用いている多数のセンサーの個性による系統誤差を、大幅に軽減することが可能となった。また、宇宙線ミュオンスペクトル

の低エネルギー成分の不定性を取り除くため、山体自体を遮蔽体に用いる、密度勾配法 (GDM) が用いられた。このように系統誤差を大幅に軽減し、解析の再現性や精度を向上させた結果、先験的な情報を組み入れる必要が最低限となり、自動解析アルゴリズムの実効性を発揮することが可能となった。厚み 1.3 km から 1.6 km の対象に対して、厚みに応じたミュオン・フラックスの変調を精度良く確認することに成功し、自動解析アルゴリズムの有効性が実証された。同様の解析手法を用いて、有珠山を観測したところ、1977-78 年の噴火時に、有珠新山の隆起にもなって生じた断層の東側に、貫入マグマを示唆する大規模な高密度岩体をイメージングすることに成功した。貫入マグマの位置は、従来の地球物理学的モデルから導かれたものと調和的である。昭和新山については、乾板と鉛板を交互に複数重ねた新型の多層型乾板検出器を、山麓に 4ヶ月間設置し、本年度導入した 2 台目の乾板読み取り装置により、解析を行った。この多層型乾板検出器では、ミュオン観測にとってノイズとなってしまう低エネルギー粒子の飛跡を積極的に曲げ、ノイズを低減する事ができる仕様となっている。上記の観測結果から、実際にノイズが低減していることを確認し、より信頼性の高い火山観測手法が可能となることを示した。浅間山北側斜面では、火山噴火予知観測研究センターの支援を受けて、2010 年度に開発したソーラーパネルで駆動可能な Mu-CAT (Muon Computational Axial Tomography) システムによる観測を継続している。浅間山東側に設置されている従来型システムと組み合わせることにより、浅間山山頂付近の密度構造を 2 方向からモニターすることができる。これにより火山活動の推移予測に貴重な 3 次元データをオンライン・リアルタイムで取得している。また、地震火山噴火予知研究計画への貢献として、活動が活発化している桜島火山のイメージングに、京都大学防災研究所との共同研究を継続している。山頂近傍への接近が危険であることから、海岸線付近にセンサーを設置せざるをえないが、固体部分の厚さが 4km 程度に及ぶため、十分な解像度を得るにはさらに時間が必要と見込まれている。暫定的に得られた昭和火口・南岳 A, B 火口に続く火道サイズ情報と、絶対重力の連続観測データとを組み合わせ、火道内のマグマ頭位を推定する試みが行われ、火山活動の盛衰との一致が認められつつある。雲仙普賢岳については、本センター・九州大学・名古屋大学とイタリア側 (ナポリ大学他) の共同研究として実施している。雲仙風穴 (標高 1300m) 内部に設置していた原子核乾板をイタリアと共同で解析した。非常に暫定的な結果として、溶岩ドーム北部表層の空隙率が、南西部の表層よりも高いことが検出された。現在、最終的な密度構造をまとめる段階にある。ストロンボリ火山については、伊ナポリ大学との共同研究として、その火道観測計画を進めてきた。同火山の観測インフラは十分には整備されておらず、また、火道の直径が 10m 程度と小さいことが予想されたため、ミュオン検出器として、電源不要かつ空間分解能の高い原子核乾板を用いている。火口から 500m 離れた観測点のデータを、共同で解析中し、現時点で、非常に鮮明な像が得られていることが確認されている。火道イメージングに向けて解析を進めた結果は、ストロンボリ型噴火のメカニズムの解明に、大きく貢献するものと期待される。カナリア諸島については、2012 年 10 月、0.5m<sup>2</sup> のミュオン検出器を Tenerife 島 Teide 山頂付近に設置した。2013 年 4 月までに回収、現像を行い、解析を開始する。火口浅部の内部構造情報は、過去・将来の噴火形態を予測する上で大きく貢献すると期待される。また、ミュオン検出器を Tenerife 島に数多く存在する横穴坑道に設置し、より高度な地熱貯留層探索を行うことを計画した。2012 年 10 月、探査に用いるミュオン検出器のチューニングおよび性能確認を現地で行い、2013 年 4 月頃からの本観測に備えた。

#### (b) 地すべり断層地帯における地下水レベルの、ミュオンによるダイナミックイメージング (地下水位測定との比較)

地震及び地すべりに関与する断層面の摩擦係数は、水の存在に大きく影響されるといわれている。特に、天然、人工を問わず、湖付近の地すべりは、津波を引き起こす可能性がある。実際に最近の報道によれば、スイスのレマン湖に土塊が落ち込み、ジュネーブが津波に襲われていることから、防災面でも地滑りと水との関係の理解は大変重要である。しかし、地下水レベルは、現状では以下の 2 つの方法によって推定されているに過ぎない。(1) 鉛直孔を用いた水位測定、(2) 比抵抗測定による低抵抗領域のイメージング。(1) の方法では一次元的な情報しか得られない。また、(2) の方法では 2 次元的な画像が得られるものの、見たい深さに相当する長さ程度の測線を張る必要があり、用地調達に関して問題がある。これらの方法を克服する第 3 の方法として、1(b) で開発したミュオン観測装置を用いた地下水の可視化を、浜松市天竜区の水平坑を用いて試みた。2012 年 8 月に行われたミュオン観測中に 2 度の大雨があり、そのうち 1 回の大雨において、不均一かつ大幅な地下水レベルの上昇を視覚化することに成功した。また、大雨においても密度が変化しない、基準地下水レベルの視覚化も行った。残念ながら観測期間中にボアホール水位計が故障していたために、ミュオン観測との比較を行うことは出来なかったが、過去の類似した降雨パターンの際の地下水位観測結果と調和的な結果を得た。今後、実時間レベルで地下水位計との相関を取れるように解析法を改良していく予定である。

また、カナリア諸島 La Palma 島 Cumbre Vieja 火山の地滑り面の調査に着手した。ここで地滑りが発生すると、大西洋に巨大な津波を起こす可能性が指摘されている。現地の地質学者と共に地滑り面付近の現地調査を行い、ミ

ミュオン検出器設置ポイントを決定した。観測は 2013 年 4 月から開始する。

(c) ミュオンイメージングと比抵抗測定のコジョイント・インバージョン

(b) で観測している地すべり地帯において、リアルタイム比抵抗測定を実施した。2012 年 8 月に行われたミュオン観測と同時にリアルタイム比抵抗測定を実施し、大雨時における、抵抗低下領域とミュオン観測で測定された密度上昇領域との比較を行った。ミュオン測定器の視野角から制限される、密度上昇領域の上端と、比抵抗測定の基線長から制限される抵抗低下領域の下端がわずかにしか重ならなかったため、コジョイント・インバージョンを行うことは難しかったが、両者において、大雨時に地下で変化した領域は調和的であった。今後、ミュオン測定のコジョイントを変更することで、比抵抗測定の測定領域と重なる部分を増やし、コジョイント・インバージョンを行う予定である。

(d) 大気ニュートリノの物質振動効果を用いた、地球深部の化学組成推定

地球中心核の主成分は、内核外核共に鉄と軽元素の合金であると考えられており、その化学組成を知ることは、核形成のメカニズムや核のダイナミクスを知る上で重要である。また、上部マントルと下部マントルでは化学組成が異なる可能性が示唆されているが (Murakami et al, 2012), それらを知ることは、地球形成の歴史を明らかにする上で重要である。

地球内部の化学組成は、深部になるほど試料の採取が困難となることから、結晶理論や高圧実験によって推定されてきた。われわれは大気ニュートリノを用いて、原子番号 (Z) と原子量 (A) との比 (A/Z 比) をイメージングする手法の開発に着手した。

大気ニュートリノは 106eV を下回るものから 1014eV を上回るものまでと、幅広いエネルギーを持っている。ニュートリノの断面積は概ねエネルギーに比例するため、特にエネルギーの高いニュートリノ (VHE ニュートリノ) は、地球内部で吸収される。この吸収を用いて、地球内部の質量密度を測定することができる。この研究は既にアイスキューブ実験ですすめられている。

一方、低いエネルギーのニュートリノは、断面積が極めて小さく、地球を容易に貫通するため、質量密度の測定には適さない。しかし、太陽ニュートリノや原子炉ニュートリノの観測により、ニュートリノは質量を持ち、その結果、ニュートリノは伝播中に別のニュートリノに変化することが分かっている (ニュートリノ振動)。その変化する割合は、ニュートリノと他のニュートリノの質量の差、エネルギー、伝播距離で決まる。また、電子ニュートリノの質量は、媒質中の電子数密度で決まる。従って、電子ニュートリノが他のニュートリノに変化する割合を、エネルギー毎に測定することで、地球内部の電子数密度を測定することができる。

上記 2 つの手法を組み合わせることで、地球内部の A/Z 比を測定することが可能となり、さらには、化学組成に制限を与えることが可能となる。今後はモデル計算の精緻化を行い、巨大なニュートリノ検出器 (例えばハイパーカミオカンデ等) を用いた場合に、どの程度の精度で地球内部の電子数密度が測定できるのかの見積もりを行う。

(e) 宇宙線電磁成分を用いた、表層土壌水分のモニター

地表に降り注ぐ宇宙線には、ミュオン以外にも電子、陽電子、ガンマ線から成る電磁成分が含まれており、これらは厚さ数十 m 程度の比較的薄い構造物の透視に適している。

今年度は、電磁成分を安価かつ効率的に弁別する検出装置の開発を行った。また、プールの底に検出器を設置して電磁成分を観測し、同検出器を用いて、10cm の水位の変動が測定可能であることを確認した。2011 年度から継続している桜島有村観測坑での試験観測の結果では、降雨開始 2 時間後に地下水水面が 20cm 上昇し、その後 6 時間程度かけて下降することを、3 $\sigma$  以上の有意度で確認した。これは、地下水流を観測する新たな手法の開発に成功したといえる。

今後は、さらなる定量化及び誤差要因の解明をすすめる。これまで測定が難しかった無機土壌における斜面水文観測を行い、降雨に伴う地盤擾乱 (ダイヤランシー等) や、重力測定・傾斜測定等の、降雨によって擾乱を受けやすい地殻変動データの定量的な補正を目指す。また、将来的には、地滑り面周辺の土壌水分量の時空間変動の測定等、土砂災害防止のための基礎データの提供を目指す。

同手法は構造物中の水分量の時空間変動を測定する新たな手法であるのみならず、数 m から数十 m までの、X 線でもミュオンでも透視できない構造物の透視を行う手法であるため、巨大樹の空洞測定等、幅広い応用が期待される。

(f) 惑星・衛星研究への高エネルギーラジオグラフィーの応用研究

火星の大気圧は地球の0.7%程度しかなく、通常はミュオンが生成されない状況にあるが、中間子のフラックスがハドロンの反応長の計算から火星の水平方向の大気のコラム密度のおよそ80%で最大値をとるため、水平方向のミュオンを利用するラジオグラフィーにとっては大気による減衰がない分、地球よりもよい環境にある。現在の火星の火山活動の有無についての見解は大きく分かれ、特に小規模の火山活動に関しては可能性が示唆されている。このような小規模の火山にターゲットをあて、次々回の火星ミッションに火星でのミュオンラジオグラフィー観測をのせるべく、NASA-JPLとの共同研究を継続している。2012年度はミュオグラフィーと、既存の火星の構造探査手法(ガンマ線, 中性子, 地中レーダー)との比較検討を行い、有利性, 不利性の議論を行った。有利性は(特に惑星ミッションで重要となる)パッシブである(大電力が不要)ということ, 不利性はランディング(惑星周回衛星では観測できない)が必要であるということと結論された。また、火星の小規模な火山を模した地球上の小規模火山において、乗用車からの周回観測を行い、地形に関する先験情報が無くても、山頂に隠れる火口の存在を検出できる方法を開発し、検証した。火口の存在を検出できるということは、山体内部に同様な密度異常があれば、検出できることを示している。この技術はリアルタイムに地形が変形するような地球上の火山(たとえば成長中の溶岩ドームなど)にも応用可能である。

### 3.8.3 国際活動

2012年4月22-27日に開かれたEGU学術総会2012では、パリ国立地球物理学研究所(IPGP), リヨン原子核物理学研究所(INFL)と共同で、セッション“Geophysical tomography with high-energy particles: recent developments and applications”のコンビーナーを務めた。

2012年12月3-7日に開かれたAGU年会2012では、NASA-JPL(IPGP)と共同で、セッション“Cosmic Ray Muon and Neutrino Imaging: Emerging Tools for Earth and Planetary Sciences”のコンビーナーを務めた。

2012年10月27-28日には、フランスで開催された国際シンポジウムInternational Workshop on Muon and Neutrino Radiography 2012でChair of International Advisory Committeeを務めた。

国外における共同研究は、2で述べたように、イタリア・ストロンボリ島及びスペイン・カナリア諸島において実施した。相手方は、それぞれナポリ大学及びInstituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER)である。

## 3.9 巨大地震津波災害予測研究センター

教授	堀宗朗(センター長), 佐竹健治(兼務), 古村孝志(情報学環, 兼務), 佐藤慎司(工学系研究科, 兼務)
准教授	市村強, ラリス・ウイジャラットネ
特任研究員	田中聖三
外来研究員	等々力賢, パディ・シマンチャル, 森太志
大学院生	竹本帝人(D3), Fangtao Sun(D3), 野中翔(D1), 藤田航平(D1), Aguilar Melgar Leonel(D1), Jayasinghe Supun(D1), Pal Mamendra(D1), 杉田恵(M2), 古宇田剛史(M2), Suarez Torres Harold(M2), Wei Xiaodong(M2), 縣亮一郎(M1), 田中貴大(M1), 依田貴大(M1), Vasquez Angel(M1), Nabeel Muhammad(M1), Jacob Stephen(M1)
研究生	Wang Sheng
学部学生	水迫覚信

巨大地震津波災害予測研究センターは、東日本大震災を契機として2012年4月に設立された研究センターである。「想定外」というキーワードに象徴されたように、2011年東北地方太平洋沖地震は我が国観測史上最大の地震であり、この地震が引き起こした東日本大震災はさまざまな被害をもたらした。従来の科学では予測が難しかった巨大地震・津波とその被害を減らすためには、理工学の連携強化が重要課題となっている。そして大規模数値計算を利用した地震・津波と災害の予測研究が課題解決の方法である。巨大地震・津波と災害の予測に関する新しい計算科学の研究領域を開拓するために、情報学環・工学系研究科と地震研究所が本センターを設置した。

新しい計算科学の研究領域は、解析手法の開発・利用による情報生成と各種解析結果の情報統合という分野である。情報統合は観測・実験等の融合強化も含む。また大規模数値計算を基盤とした理工学連携を進めることで、巨