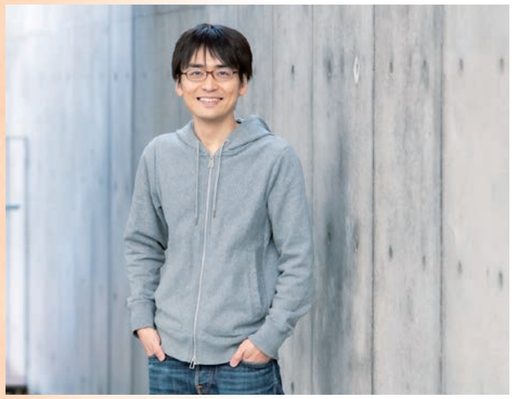
μ 研究室

宇宙線イメージング研究室



森島邦博准教授

*森島邦博　准教授　*Kunihiro Morishima, Assoc. Prof.*
北川暢子　特任講師　*Nobuko Kitagawa, Assist. Prof.*

μ研では，宇宙線中に含まれるミューオンを活用した巨大構造物内部の非破壊イメージング技術「宇宙線イメージング」の研究開発に取り組んでいます．

宇宙空間を飛び交う宇宙線が地球大気と衝突して発生する二次宇宙線中に含まれるミューオンは幅広いエネルギー分布を持ちます．物質の種類とその厚さ（通過する物質の密度と距離の積）に応じて透過可能なミューオンのエネルギーが決まり，物体を透過する際にミューオンの数は減少します．対象物を透過して飛来するミューオンを三次元飛跡検出器で観測し，その飛来方向を計測する事で，その内部の密度コントラストをX線撮影のように非破壊で可視化する事ができます．この技術は，X線撮影などの従来の非破壊イメージング技術では到達不可能な厚さ（最大数km）の物体にまで適用できるため，大型構造物（ピラミッドなどの考古遺跡や原子炉・溶鉱炉などの工業用プラント，土木構造体や建築物など）や自然対象物（火山や地質調査，断層など）の内部を非破壊でイメージングすることが出来ます（図1）．従来の技術では見る事が出来なかった“もの”や“事象”を観察する事で，新たな発見や価値が生み出されます．本研究室では，研究対象や分野を問わず宇宙線イメージングを活用した新しい研究に挑戦しています．

https://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/2011/appli/muon/

*連絡先　morishima@nagoya-u.jp

准教授：1／特任講師：1／DC：2／MC：9／B4：2

宇宙線イメージング技術の開発

宇宙線イメージングの検出器として名古屋大学独自の原子核乾板技術の開発を進めています．原子核乾板は銀塩写真フィルム型の固体飛跡検出器であり，宇宙線中に含まれる素粒子ミューオンの軌跡をサブミクロンの精度で三次元的に記録して可視化します．原子核乾板に記録された宇宙線の軌跡を自動読み取り装置により光学的に読み出してデジタルデータ化した後に，宇宙線ミューオンの飛跡の再構成を行うことで飛来方向分布を導出し，対象物内部の密度コントラストイメージを構築します．原子核乾板は，写真フィルム型の検出器であるため，電力を必要とせず，軽量・コンパクトであり，高い可搬性があります（図2）．自由に大きさや形状を設計出来るためボーリング孔などの狭い空間にも設置が可能です．また，生産性の高さから，100平方メートル級の超大面積検出器や多地点からの同時観測による三次元計測も実現できます．

宇宙線イメージングの観測対象は屋内外問わず多岐にわたり，検出器を設置する場所は対象に応じて様々です．屋外や地下環境では天候の変化や水などの影響もあり，あらゆる環境下で観測期間中の検出器の性能を維持する必要があるため，原子核乾板検出器のセンサー部である原子核乳剤の開発や添加する化合物の探索を行い，長期間に渡り安定な原子核乾板の開発を進めています．また，様々な環境下での高い温度耐性が期待されるガラス基板を用いた新しいタイプの原子核乾板の開発や，環境放射線耐性の向上などの課題があり，原子核乾板のハードウェアとしての開発からそのオフライン解析に至る検出器技術の開発を進めています．

観測から得られる宇宙線イメージの理解のために，対象の三次元モデルに宇宙線を照射するシミュレーションの開発も進めています．観測対象の厚さに依ってイメージングに用いる宇宙線のエネルギー領域が異なるため，宇宙線のエネルギースペクトルの理解が不可欠です．そのため，宇宙線ミューオンのエネルギースペクトルの測定に特化した新型原子核乾板検出器を開発して様々な場所で全方位の宇宙線スペクトルの測定を計画しています．更に，観測対象を複数地点から同時に観測してその結果を複合的に解析する事でX線CTのように対象物の内部の

μ研メンバー

図1：宇宙線イメージングの対象．検出器を観測対象の周辺または下部に配置することで，地上構造物や地中を可視化する．

三次元密度分布の再構成が可能です．このような宇宙線トモグラフィの技術開発やイメージング性能の向上のために情報数理や機械学習などの技術を取り入れることも検討しており，新しい技術を積極的に取り込みながら開発を進めています．

宇宙線イメージングの研究対象

[考古遺跡の探査]

宇宙線イメージングによりエジプトのピラミッド群を調査する国際共同研究ScanPyramidsを推進しています．2015年に始まったこのプロジェクトでは，エジプトのクフ王のピラミッドの探査により，ピラミッドの北面背後の通路状の空間（2016年）と中心部の巨大な空間（2017年）を発見しました（図3）．現在，発見した空間の詳細な三次元形状の解明に向けて複数地点からの観測と解析を続けています．2022年度より，カフラー王のピラミッドの探査を開始しており，異なるピラミッド間の密度の比較などを通して，ピラミッドの建築方法の解明や新空間が果たす役割について科学的に迫る文理融合型の研究へ発展しています．この他にも，ホンジュラスのコパン遺跡にあるマヤの神殿ピラミッド内部の未知の王墓の探査やイタリアのナポリの市街地にある地下遺跡の調査なども進めています．このように，考古学的な発見からその発掘までを見据えた新しい研究手法として宇宙線イメージング考古学を提唱し，技術開発を行いながら遺跡の探査を進めています．この技術は，国内外問わず様々な遺跡調査に適用可能であり，ここに挙げた遺跡の他にも観測の提案を行っています．

[原子炉や溶鉱炉などの工業用プラントの内部診断]

原子炉や溶鉱炉などの工業用プラントの内部の可視化

図2：屈折ピラミッドの内部に原子核乾板検出器を設置している様子（ScanPyramids）．

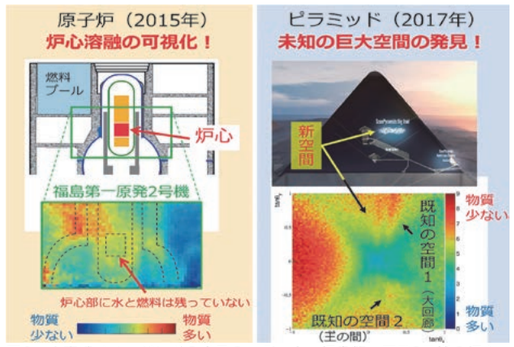


図3：宇宙線イメージングの成果の一例．左：福島第一原発2号機の炉心溶融の可視化．上図は原子炉の断面図を示し，下図は炉心周辺部の宇宙線イメージ．炉心部には重い物質が残っておらず炉心溶融が起きていた事を明らかにした（2015年）．右：エジプトのクフ王のピラミッド内部の可視化と未知の巨大空間の発見．上図はピラミッドの断面図と発見した空間のおおよその位置を示す．下図はピラミッドの中心部の宇宙線イメージ．既知の構造に加えて未知の巨大な空間を発見した（K. Morishima et. al., Nature 552, 386 (2017)）．

による診断技術の開発を進めています．2011年3月11日の東日本大震災により損傷した福島第一原発2号機の炉心溶融の可視化を行いました（図3）．これまでに，原子炉の炉底部の観測技術の開発や溶鉱炉の内部を観測する研究などを企業と共同で進めてきました．

[火山の観測]

イタリアのストロンボリ火山や静岡県の大室山などの火山を対象とした研究に参画しています．山体を通り抜ける宇宙線ミューオンの頻度は極めて少なく，また，ミューオンに対する他粒子の割合が増加し観測ノイズとなります．このような厚い対象の内部を高いコントラストで可視化するためには，大面積検出器で長期間に渡り観測する必要があり，そのための技術開発および高いノイズ除去能を持つ検出器構造の最適化を進めています．

[社会インフラの点検技術]

社会インフラの老朽化などによる事故や集中豪雨による災害に対する防災技術の開発も進めています．例えば，道路の陥没は地下空洞が原因となりますが，宇宙線を使って検知する事で対策ができます．堤防の脆弱部を宇宙線により検知できれば，その部分を補強する事で決壊を防ぐことが出来るかもしれません．このように地盤や土木構造体の劣化状態を早期に診断・把握出来れば，社会インフラの長寿命化や維持管理に役立ち，国民の安心・安全な暮らしを守る事や経済的な損失を抑える事にもつながります．

さいごに

これまでに挙げた研究対象に加えて，資源探査，洞窟探査，断層検知，水中遺跡調査，焼却炉，発電炉，城壁，石垣，古墳，樹木，文化財，地質調査，ダム，橋梁など，数えきれないほど多種多様なものがこの研究の対象です．これらの研究には，宇宙線観測技術を駆使するだけでなく，対象とする研究分野の専門家や企業・自治体との産官学間の連携・協力が不可欠です．そのため，積極的に異分野の研究者と交流し，共同研究を進めています．新しい研究領域を共に切り拓き，積極的に取り組む意欲的な学生を歓迎します．