

「ミュオン」で見えてきた新しい世界

地球の大気圏の上層部で大気中の原子核と宇宙線の相互作用によりミュオンが生まれる。ミュオンを利用して、他の方法では不可能な大きな物体の内部を観察する試みが行われている。一方、ミュオンを人工的に生成して利用する取り組みに期待が高まっている。

浅間山の噴火のようすを宇宙線ミュオンで明らかにする試みが行われている。



透過してきたミュオンの数を観測する検出器
南日本新聞2009年2月28日より

地球にたえず降り注ぐ宇宙線ミュオン

1897年にJ・J・トムソンによって電子が発見されて以来、原子核の発見、陽子、中性子、ニュートリノや種々の中間子などが次々に発見され、物質をかたちづくる基本構造が徐々に明らかにされてきた。

物質を構成するもっとも基本的な粒子であるクォークとレプトンは、その質量によって「世代」と呼ばれる3つのグループに分類されている。第1世代から第3世代へと質量が大きくなっていくが、そのうち第2世代のレプトンに属するのが、ミュオン（ミュー粒子）である。

ミュオンは、電荷をもつ素粒子で、負の電荷をもつミュオンは、電子と良く似た振る舞いを示す。ただし、ミュオンの質量は電子の約200倍、陽子の約9分の1と、電子と比較して非常に大きいものになっている。

自然界では、ミュオンは宇宙から地表に降りそそいでいる宇宙線の一種として観測される。宇宙線とは、超新星の爆発や太陽表面の爆発などの宇宙空間での自然現象によって発生した高いエネルギーをもった高速で移動する粒子の総称で、

地球に降りそそぐ宇宙線の約90%を陽子、約8%を α 粒子（ヘリウムの原子核）が占め、これらを一次宇宙線と呼んでいる。一次宇宙線は地球に到達すると、大気圏の上層部で空気中の窒素や酸素などの原子核と衝突したり、相互作用を引き起こ

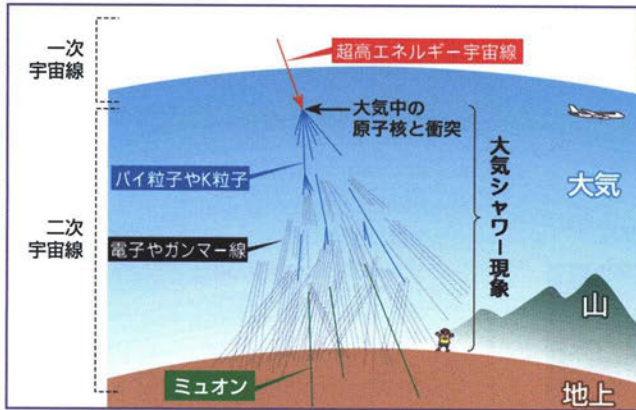
■素粒子の「標準模型」

「標準模型」では、物質をかたちづくる12種類のフェルミ粒子（クォークとレプトン）と力を伝える4種類のボース粒子、未発見の質量を与える粒子であるヒッグス粒子から宇宙が構成されていると説明される。

物質粒子				力を伝える粒子	
	第1世代	第2世代	第3世代	強い相互作用	
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ	g グルーオン	
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム		
レプトン	ν_e 電子ニュートリノ	ν_μ μ ニュートリノ	ν_τ τ ニュートリノ	電磁相互作用	
	e 電子	μ ミュオン	τ タウ	γ 光子	
				弱い相互作用	
				W⁺ W⁻ Z Wボソン Zボソン	
質量を与える粒子（未発見）				H ? ? ... ヒッグス粒子 ヒッグス粒子 ヒッグス粒子	

■宇宙線が地表に到達する様子

一次宇宙線は、大気圏上層部で大気中の原子と反応し、二次宇宙線を発生させる。発生した二次宇宙線も高いエネルギーを持っているために、大気中で次々に二次粒子が発生する「大気シャワー」現象が生じる。地表に到達する二次宇宙線のほとんどはミュオンやニュートリノである。



す。その際に核反応をおこして放射性同位元素が生成したり、相互作用によってパイ中間子などが発生したりする。このように一次宇宙線が大気中に飛び込むことによって新たに生まれた宇宙線を、二次宇宙線と呼んでいる。高いエネルギーを持つ一次宇宙線から発生した二次宇宙線も高いエネルギーを持つため、二次宇宙線がさらに新たな二次粒子を生み出す。二次宇宙線が連鎖的に生成し、大気中で大量の二次粒子が発生する現象は、「大気(空気)シャワー」と呼ばれている。二次宇宙線は、ミュオン、ニュートリノ、電子、 γ 線、中性子などが主な構成成分であるが、地表に到達するのはほとんどがミュオンとニュートリノである。

このうち、ミュオンの寿命は非常に短く、わずか 2.2μ 秒で電子とニュートリノに崩壊してしまふ。しかし、地表ではたとえば垂直方向から飛来する 1GeV 以上のエネルギーを持つミュオン強度は、

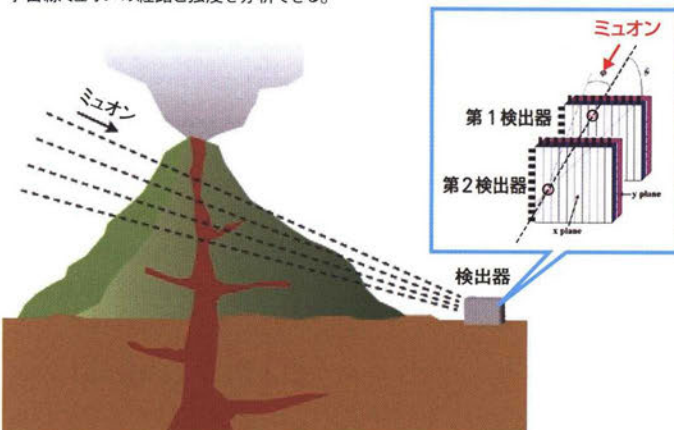
1cm^2 あたり1分間に1個程度とされている。これは、一晩で人体を約100万個の宇宙線ミュオンが通り抜けることになるミュオン強度である。寿命の短いミュオンが地表で観測できる理由は、「高速で移動する物体では時間の進み方が遅くなる」という相対性理論によって説明される。地表に到達する宇宙線ミュオンは非常に速い速度で移動している。仮に宇宙線ミュオンが光速の99.87%で飛行したと仮定すると、宇宙線ミュオンの寿命は 2.2μ 秒から 44μ 秒に伸びることになる。また、それに伴って飛行工程は 659m から 13km までのびる。これによって大気圏上層部で発生した宇宙線ミュオンが地表まで到達するのである。

ミュオンラジオグラフィで大きな物体の内部を見る

ミュオンの特徴のひとつは電荷を持っていることである。このため、ミュオンには電子と同様に電磁相互作用が働くことになる。しかし、陽子や中性子のような原子核内で作用する強い相互作用には反応しない。現在、ミュオンのこの性質を利用したイメージング技術が開発されている。質量の小さい電子は数十 cm 以上の物質を通り抜けることはできない。電子と比較して大きな質量を持つ陽子や中性子は、物質中で強い相互作用を受けるため、 1m 程度しか透過することができない。これに対して、高いエネルギーをもったミュオンは、従来までのX線や中性子線などの他の粒子では透過することのできない厚い岩盤や金属塊、建築物や火山などを透過できる。この性質を利用した宇宙線ミュオンによるラジオグラフィ(放射線を用いた非破壊透過測定技術)の研究が進んでいる。宇宙線ミュオンのラジオグラフィを利用することによって、建築物などの巨大な物体や山

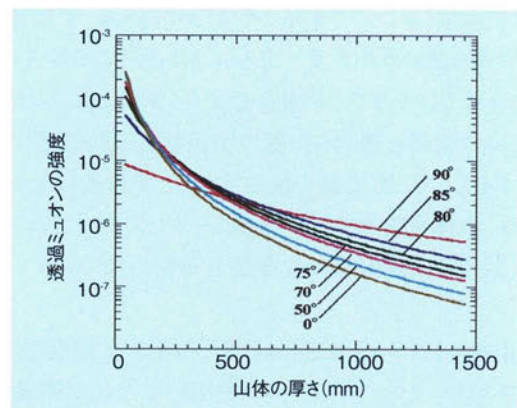
■宇宙線ミュオンラジオグラフィの概念図

山体を通過してきた宇宙線ミュオンを2つの検出器で捉えることで、宇宙線ミュオンの経路と強度を分析できる。



■様々な天頂角に対する宇宙線ミュオンの強度の変化例

密度 $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ の山体を通過する宇宙線ミュオンの強度変化を計算したもの。天頂角が変わると、透過するミュオンの強度も異なる。



資料提供: 東京大学地震研究所

浅間山の噴火を宇宙線ミュオンラジオグラフィで解析

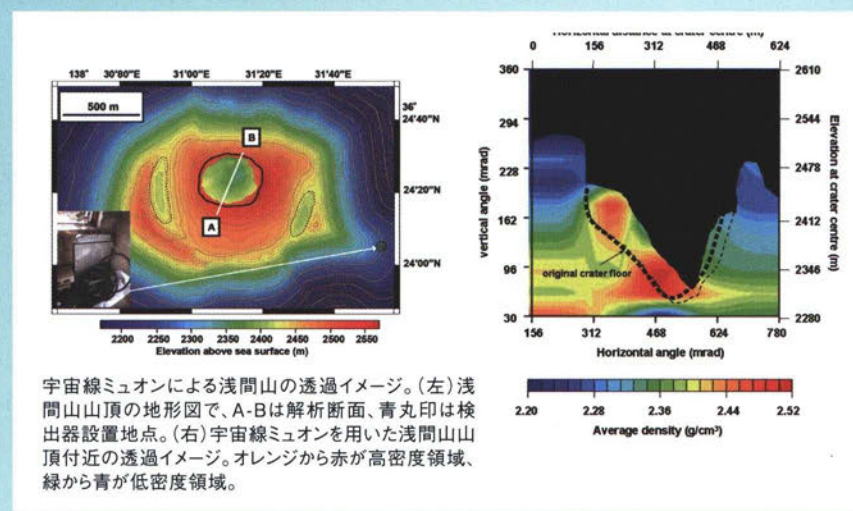
群馬県と長野県の境に位置する浅間山は、世界でも有数の活火山として知られている。標高は2,568mで、噴火と崩壊を繰り返した山体はおおよそ円錐形である。浅間山の噴火様式はブルカノ式噴火と呼ばれ、固結した溶岩によって塞がれていた火口が、マグマから分離したガスの圧力によって開かれ、爆発し、それに伴って火山灰などを大量に噴出するのが特徴である。気

象庁では、地震計、空振計、傾斜計、GPS、遠望カメラなどによって、火山活動の監視と観測を継続している。

この浅間山を宇宙線ミュオンラジオグラフィによりイメージングすると、図中に点線で示されている旧火口底の上に、2004年の噴火によって、固結したマグマを示唆する高密度物質(図中の赤～オレンジで示される領域)が存在していることがわかった。

さらに、旧火口底の下には、マグマの通り道と推測される空洞を示唆する低密度領域(図中の緑～青色で示される領域)の存在が確認された。

2009年2月2日の噴火の前後でも宇宙線ミュオンの測定が行われており、その際、火口中間～火口底でミュオン強度の有意な増加、すなわち質量移動があったことが観測されている。しかし、火口底よりも深い部分ではミュオン強度の増加が認められないことから、2009年2月2日の噴火は水蒸気爆発により、火口に堆積していた古い溶岩などが吹き飛ばされた現象であると分析されている。



資料提供:東京大学地震研究所

の内部などを、地震波などを用いた従来の地球物理学的観測よりも非常に高い空間分解能で密度測定することが可能になる。これまでに、高エネルギーの宇宙線ミュオンの高い透過力を利用して、火山の内部構造や製鉄所の高炉内部を調査する試みが行われている。

一次宇宙線は宇宙のあらゆる方向から地球に飛来している。そのため、宇宙線ミュオンも全天のすべての方向から飛来することになる。地表に到達する宇宙線ミュオンは、入射角度(天頂角)によってエネルギー分布が異なることがわかっている。垂直方向から水平方向(天頂角90度)へと天頂角が大きくなるに従って、高いエネルギーの成分が増える。宇宙線ミュオンは天頂角を決めるとほぼ一定のエネルギースペクトルを持つことがわかっているため、未知の密度長(密度と長さの積の積分値)を持つ物体を透過した際の宇宙線ミュオン強度の減衰を評価することで、密度長を推定することが可能になる。この密度長を、山体を透過する宇宙線ミュオンについて次々に求めていくことで、山体内部の密度長分布をマッピングすることができる。

宇宙線ミュオンの測定には、原子核写真乾板を用いる方法やプラスチックシンチレーターを用いる方法が開発され、実際の測定に用いられている。これらを利用して、例えば東京大

学地震研究所では、これまでに浅間山、昭和新山、桜島、薩摩硫黄島などで観測を実施し、大きな成果をあげている。

見えなかった高炉の内部を透視する

産業分野では、宇宙線ミュオンを利用して、高炉内の状態を測定しようという研究が行われている。高炉の高出銑比操業を行うための課題として、銑滓の排出が挙げられる。そのためには高炉の炉下部のセンシングが不可欠であるが、温度センサーによる測定には限界があった。そこで着目されたのが、宇宙線ミュオンの高い透過性である。

実際の測定試験は、解体する高炉の吹き止め後に取り出した炉底マンテルを対象に行われた。水平方向近くの宇宙線ミュオンは、2台の検出器によって測定され、高炉炉壁、炉内部、炉底の銑鉄とレンガの密度や位置が計算された。高炉内は耐熱レンガで保護されているが、測定の結果、レンガの損耗は15～20cmと推定されている。

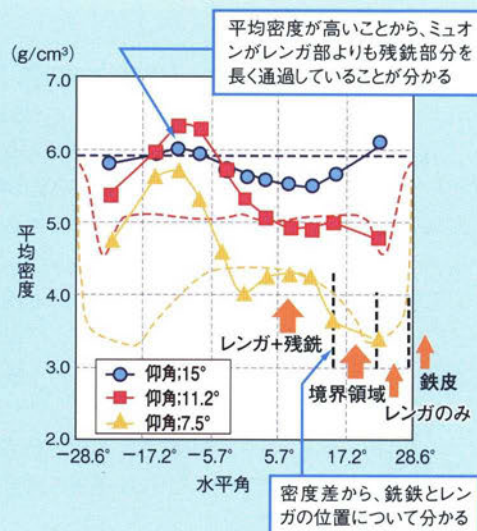
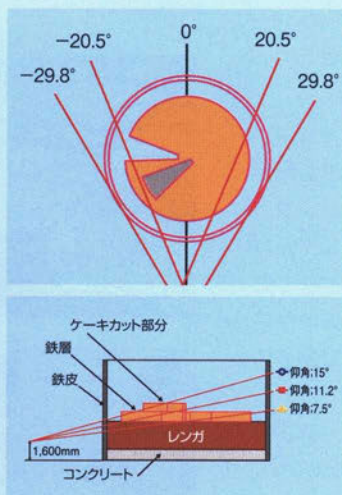
高温の高炉内をリアルタイムでセンシングできる技術は少なく、宇宙線ミュオンのラジオグラフィによる高炉内のイメージング技術は、効率的な操業に役立つ技術として大きな期待が寄せられている。

■高炉解体炉底での宇宙線ミュオン測定

高炉の炉底部脇に検出器を設置し、高炉を透過するミュオンの数を検出した。ミュオンの強度により、ミュオンが通過する経路上の密度を算出することができる。この結果、レンガの損耗は約15~20cmと推定された。この測定結果は、実際に解体した高炉内部の密度とほぼ一致することがわかった。



旧大分第2高炉の解体



資料提供:新日本製鐵(株)

人工的に生成する加速器ミュオンの利用

人類はこれまでに、X線、電子線、中性子線、陽子線などを人工的に作り出し、「科学の眼」として利用してきた。現在、加速器によって作られた加速器ミュオンが、新たな「眼」として加わろうとしている。日本では、1980年に高エネルギー物理学研究所(当時)に作られたミュオン科学研究施設(MSL)が、世界初のパルス状ミュオンビームの発生に成功している。MSLは国内のミュオン利用研究の中心であるとともに、世界的なパルス状ミュオン利用機関として利用された。MSLの後継として茨城県東海村に建設されたのが、大強度陽子加速器施設(J-PARC)のMLF(物質・生命科学実験施設)であり、2008年9月にミュオンビームの発生に成功している。

J-PARCでは高周波加速器(RCS)によって、光速の約97%まで加速された陽子ビームを生成する。陽子ビームを黒鉛でできた厚さ2センチのミュオン生成標的に衝突させることで、さまざまな粒子を生成させる。このときに生成したパイ中間子がおよそ5000万分の1秒で崩壊し、ミュオンになるのである。J-PARCでは現在、5~50MeVの高速ミュオンビームと4MeVの低速ミュオンビームを発生させることができる。加速器ミュオンは、宇宙線ミュオンと比べて、一個あたりのエネルギーは10の4乗分の1と非常に小さい。このため、透過距離は山体を透過する宇宙線ミュオンと比較してわずか数m以下と短い。しかし、単位時間・単位面積当たりの個数は10の12乗倍と非常に多く、高い強度が得られるため加速器ミュオンはその強度を用いて種々の分析に活用されている。

ミュオンを利用した分析方法にはいくつかの種類がある。代表的な方法は、電荷を持った素粒子であるミュオンのスピンの変化を利用する「ミュオンスピン回転・緩和・共鳴法(μ SR法)」である。

加速器で作り出されたミュオンビームはスピンが揃っているの、測定対象物を透過したミュオンは、対象物の原子の中の電子の状態の影響を強く受けていることになる。 μ SR法によって、物質内部の微小磁性構造などを解明することができる。中性子

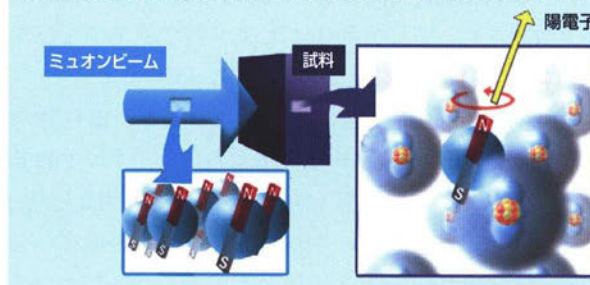
■ミュオン科学の範囲

基礎科学	物 性 物 理 学	銅酸化物超伝導体の物性、量子臨界点近傍の物性、第二種超伝導の磁束格子状態、半導体中の水素同位体中心
	化 学	ラジカル化学、水素化反応のダイナミクス、超臨界状態の化学
	素 粒 子 物 理	超対称性とミュオン稀崩壊、量子電磁気学
学際分野	μ 触媒核融合	アルファ捕獲と媒質効果、超微細相互作用効果、ミュオン原子
	生 物 物 理	材料としての生命体構成物質、電子状態と分子機能
応 用	非 破 壊 分 析	バルク敏感元素分析、トモグラフィ、ラジオグラフィ
	ビーム開発	超低速ミュオンビーム、ミュオンビーム冷却/再加速
	産業利用	水素エネルギー利用関連、磁性材料評価

資料提供:J-PARCセンター

■ミュオンによる物質の微小な磁場測定の仕組み

加速器で作られたミュオンビームはほぼ100%スピンが揃った状態なので、試料に打ち込まれたミュオンは原子間でその磁場に応じた歳差運動を行う。ミュオンが崩壊する際にスピンの方向に放出した陽電子を分析することで、磁性構造を分析することができる。



資料提供: J-PARCセンター

世界有数のミュオン強度を誇る MLF

茨城県東海村の大強度陽子加速器施設(J-PARC)には、原子核素粒子実験施設、ニュートリノ実験施設と、物質・生命科学実験施設(MLF)の3つの実験施設が建設されている。MLFは、床面積130m×70m、最大高さ約30mの巨大な実験施設であり、パルス中性子とミュオンを利用するMLF建家は、陽子ビーム入射系、ミュオン科学実験装置、1MWパルス中性子源及び、中性子ビームライン実験装置群の各装置を設置する4つの領域から構成されている。

このうちミュオン科学実験施設は、世界で初めてパルス状のミュオンビームを発生させたMSLの後継にあたり、平成15年から建設が進められてきた。MLFのビームラインでは、陽子ビームの出す放射線を遮へいするため、数十トンもある鉄の壁が精密に組み立てられている。また、MSLで使用された超伝導ソレノイドなどを再利用している。超伝導ソレノイドはコイル全長6m、地磁気の10万倍の5テスラという磁場を形成する。この超伝導ソレノイドによって、ミュオン生成標で発生したパイ中間子の方向を揃え、ミュオンビームを形成している。



ミュオンビーム
ラインの外観

MSLから移設された
超伝導ソレノイド



黒鉛でできた
ミュオン生成標



資料提供:J-PARCセンター

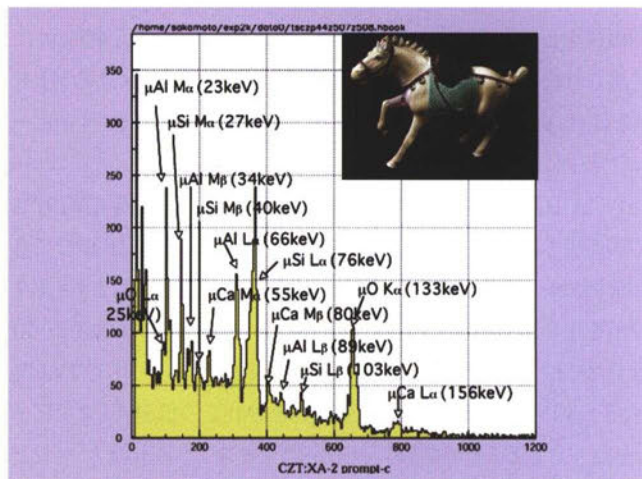
やX線を用いた分析や核磁気共鳴(NMR)、電子スピン共鳴(ESR)と互いに補完することで、物質の全体像を理解するための有力なツールとして利用されはじめている。

また、電子の200倍の質量を持つミュオンは、原子に捕獲・束縛される過程で放出するX線のエネルギーが通常の電子と比較して桁違いに高くなる。この高いエネルギーによって、ミュオンの特性X線は数mm～数cmという厚みを貫通して検出器に到達できる。通常の蛍光X線分析がナトリウムより軽い元素に対して感度が悪く、対象のごく表面の情報しかわからないことに対し、負ミュオンによる特性X線分析では、ミュオンを試料深くに注入することで、試料内部の元素分析を非破壊で行なうことが可能になる。J-PARCの高強度ビームを用いることで、従来までは測定が困難であった少量試料の分析が可能になるなど、ミュオン特性X線分析の大きな進展が期待されている。実際にJ-PARCでは、国立歴史民俗博物館の天保小判や唐三彩などの成分分析を行っており、例えば天保小判は純金でなく、金が56.8%で残りが銀であることが明らかになっている。

ミュオンはそのほかにも、酸化物超伝導体などの物性物理学、水素化反応の反応機構の解明などの化学分野、生物物理学、非破壊検査、素粒子物理学、ビーム開発、産業利用など、ミュオン科学ともいえる基礎科学から応用にいたるまでの幅広い分野での活用が期待されている。天然の宇宙線ミュオンについて

■負ミュオン特性X線分析の例

焼き物(唐三彩)の分析例。エネルギー強度から構成元素の種類がわかり、それぞれの強度から含有率がわかる。対象に損傷を与えることがないので、学術的な遺物や美術品の分析にも適している。



分析グラフ:久保謙哉氏(国際基督教大学)提供
唐三彩(模造品):齋藤努氏(国立歴史民俗博物館)提供

も、火山研究や高炉の評価のほか、建築物や橋梁の分析、古代遺跡の調査などでの利用が期待されている。人類の新しい「眼」となった、ミュオン利用技術の今後に注目していきたい。

- 取材協力 東京大学地震研究所、新日本製鐵(株)、J-PARCセンター、高エネルギー加速器研究機構、(独)日本原子力研究開発機構
- 文 杉山 香里