

ミュオンを水に照射することで生成した陽電子によるチェレンコフ光分布

## 発光イメージングを用いてミュオンビームの分布計測に成功： ビームの精度管理や素粒子研究への応用に期待

名古屋大学大学院医学系研究科総合保健学専攻の山本 誠一 教授、平野 祥之 准教授、大阪大学大学院理学研究科化学専攻の二宮 和彦 助教、高エネルギー加速器研究機構（KEK）物質構造科学研究所の河村 成肇 特別准教授の研究グループは、発光イメージングを用いてミュオン<sup>注1)</sup> ビームの分布計測に成功しました。

ミュオンは素粒子の一つで、加速器で大量に発生させることにより、超伝導物質の性質解明、考古物への元素分析など様々な分野で利用されています。このような利用研究を一層進めるには、ミュオンのビームがどのような強度や分布で飛来しているのかをモニターすることが必要です。これまでミュオンビームや、崩壊して生成される陽電子<sup>注2)</sup> のモニター方法は限られていましたが、ミュオンビームをイメージング技術の応用により可視化することができれば、ビームのエネルギーやその広がり、ビーム幅など多くの情報を簡便に得られる可能性があります。

正電荷のミュオンビームを水に照射すると陽電子によるチェレンコフ光<sup>注3)</sup> を発生させることができます。研究グループは、高感度 CCD カメラを用いてそのイメージングを試みました。その結果、楕円形に分布する鮮明なチェレンコフ光画像を得ることに世界で初めて成功しました。またプラスチックシンチレータ<sup>注4)</sup> にミュオンビームを照射しながら撮像したところ、崩壊前のミュオンビームの分布をイメージングすることにも成功しました。これらの画像から、ビームのエネルギーや、その広がり、幅など多くのビームに関する情報が得られることが確認できました。この技術は今後、ミュオンビームの精度管理や素粒子研究など幅広い分野への応用が期待されます。

本研究成果は、2020年11月26日付オンライン科学誌『Scientific Reports』に掲載されました。

### 【ポイント】

- ・高輝度ミュオンビームを水に照射しながら CCD カメラでビームを撮像することで、ミュオンが崩壊して生成する陽電子のチェレンコフ光イメージングに、世界で初めて成功した。
- ・またプラスチックシンチレータに照射しながら撮像することで、崩壊前のミュオンビームのイメージングにも成功した。
- ・今後、光計測を用いたイメージング法が、ミュオンビームの精度管理や素粒子研究など幅広い分野に応用されることが期待される。

### 【研究背景と内容】

ミュオン（ミューオン、ミュー粒子とも呼ばれる）は素粒子の一種で、様々な研究に利用されています。例えば高エネルギー宇宙線ミュオンは、非常に高い透過性を持つことから、火山や原子炉、ピラミッドなどの巨大構造物の透視に利用されており、興味深い情報が得られています。一方で、加速器で生成される高輝度パルス状ミュオンビームを利用することで、ミュオンを用いた元素分析や物性材料研究などを短時間で精度良く行えるようになり、多くの研究が行われています。特に近年は、J-PARC（大強度陽子加速器施設）<sup>注5)</sup>をはじめとして高輝度のミュオンビームが利用可能となりました。

これらの研究にはミュオンビームが、対象にどのように当たっているのか、ミュオンビームの分布やエネルギーの広がりなどの情報が重要です。ミュオンビームやミュオンが崩壊してできる陽電子のイメージングができればこれらの情報を画像から得ることができる可能性があります。

研究グループは J-PARC の高輝度のミュオンビームと、高感度の CCD カメラを利用することにより、ミュオンビームのイメージングが可能であると予想し、水中で陽電子が放出するチェレンコフ光に注目しました。チェレンコフ光は電子や陽電子などの荷電粒子が、水などの物質中を光よりも速く運動するときに生じる光です。正電荷のミュオンビームを水に照射すると、ミュオンが飛んでいる途中では光らず、ミュオンが停止したところでミュオンの崩壊によって生じる陽電子のみがチェレンコフ光を出します。そのような陽電子はエネルギーが高いことから比較的強く発光します。そこで、高感度 CCD カメラを用いたチェレンコフ光のイメージングを試みました。（図 1）。

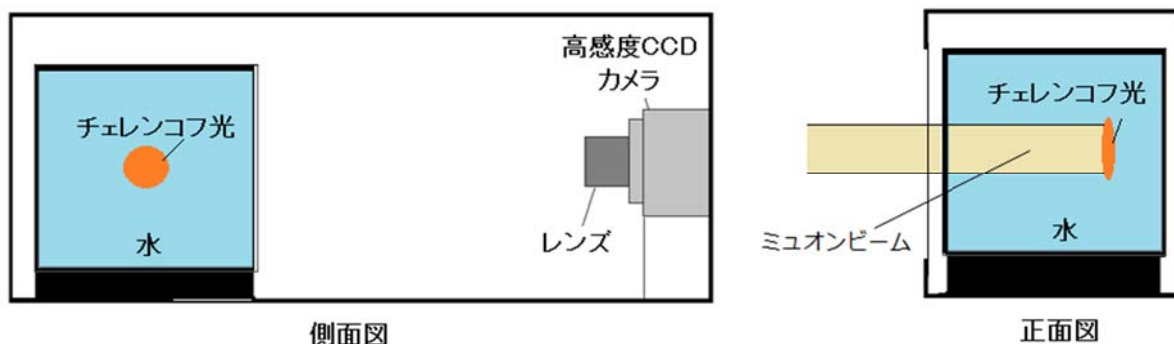


図 1. ミュオンビームイメージング法の概略図：側面図（左）と正面図（右）

その結果、5 分間の撮像で、楕円形に分布する鮮明なチェレンコフ光画像を得ることに、世界で初めて成功しました(図 2)。ミュオンビームのエネルギーを変えてイメージングを行ったところ、チェレンコフ光の発光位置が、エネルギーが高くなるに従い、ミュオンビームの照射に対して水のより深い位置(図 2 の右方向)に移動しました。

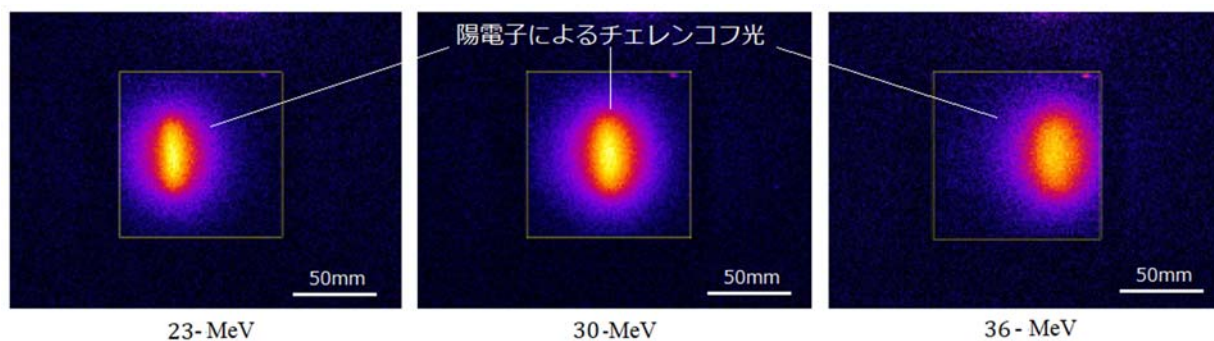


図 2. 正のミュオンビームを水に照射しながら高感度 CCD カメラを用いて撮像したミュオン崩壊陽電子のチェレンコフ光画像のミュオンビームエネルギーによる違い

またチェレンコフ光に比べ放射線に対して良く発光するプラスチックシンチレータにミュオンビームを照射しながら撮像したところ、10 秒間の撮像で、チェレンコフ光に比べ遥かに大きな発光がミュオンビームにより発生し、崩壊前のミュオンビームの分布をイメージングすることができました。(図 3)。

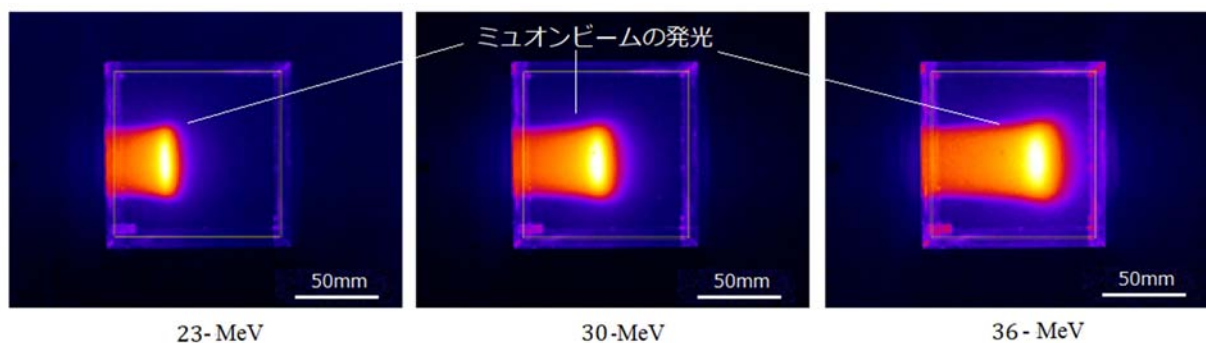


図 3. 正のミュオンビームをプラスチックシンチレータに照射しながら高感度 CCD カメラを用いて撮像した崩壊前のミュオン発光画像のミュオンビームエネルギーによる違い

このように光計測を用いて短時間でビームに関する多くの情報を含む画像を得ることが可能になりました。得られた画像を解析することで、崩壊前のミュオンビームのエネルギーや広がりのみならず、崩壊してできる陽電子分布に関する情報を得ることができることが分かりました。

## 【成果の意義】

ミュオン照射による水のチェレンコフ光画像とプラスチックシンチレータ発光画像から、ビームのエネルギーや、その広がり、幅などビームに関する多くの情報が得られる可能性のあることが確認できました。今後、ミュオンビームの精度管理や素粒子研究など幅広い分野に応用されることが期待されます。

## 【用語説明】

- 注<sup>1)</sup> ミュオン：陽子の1/9の質量を持つ素粒子で、正電荷をもつものと負電荷をもつものがある。正電荷のミュオンは2.2マイクロ秒で陽電子と2個のニュートリノに崩壊する。負電荷のミュオンは電子と2個のニュートリノに崩壊する。
- 注<sup>2)</sup> 陽電子：電子と同じ質量と、正の電荷を持った素粒子で、陽電子放出放射性核種や正の電荷を持ったミュオンから生成される。高エネルギーの加速器を使って対生成することもできる。
- 注<sup>3)</sup> チェレンコフ光：電子や陽電子などの荷電粒子が、物質中を光より速く運動するとき生じる発光で、発見者の名前から名付けられた。水中では光の速さは真空や空気中のおよそ3/4倍になるので、粒子が光よりも速く進むこともありうる。チェレンコフ光は高感度CCDカメラなどでイメージングすることが可能である。
- 注<sup>4)</sup> プラスチックシンチレータ：放射線が当たると発光する性質を持つプラスチック。放射線検出器などに利用されている。ミュオンが当たっても良く発光する。
- 注<sup>5)</sup> J-PARC（大強度陽子加速器施設）：KEKと日本原子力研究開発機構が茨城県東海村で共同運営している大型研究施設で、素粒子物理学、原子核物理学、物性物理学、化学、材料科学、生物学などの学術的な研究から産業分野への応用研究まで、広範囲の分野での世界最先端の研究が行われている。J-PARC内の物質・生命科学実験施設では、世界最高強度のミュオン及び中性子ビームを用いた研究が行われており、世界中から研究者が集まる。

## 【論文情報】

雑誌名：Scientific Reports

論文タイトル：Optical imaging of muons

著者：Seiichi Yamamoto, Kazuhiko Ninomiya, Naritoshi Kawamura, Yoshiyuki Hirano  
(山本 誠一、二宮 和彦、河村 成肇、平野 祥之)

DOI：10.1038/s41598-020-76652-8