

〈一般研究課題〉 原子核乾板による素粒子・放射線イメージング計測の
高度化

助成研究者 名古屋大学 六條 宏紀



原子核乾板による素粒子・放射線イメージング計測の 高度化

六條 宏紀
(名古屋大学)

Advances in imaging measurement for elementary particles and radiation using nuclear emulsion films

Hiroki Rokujo
(Nagoya University)

Abstract :

Nagoya University's original technology, “particle/radiation imaging measurement using nuclear emulsion plates,” is a measurement technology that has been attracting a great deal of attention in recent years. Muon radiography, which uses muons, elementary particles that come from outer space, is being used for various measurement targets, such as social infrastructure inspections and underground cavity investigations. It is expected to make a significant contribution to the creation of an environmentally conscious and energy-efficient society by helping to ensure safe and secure lifestyles and reduce economic losses. This study aims to further advance the imaging and measurement of elementary particles and radiation using nuclear emulsion plates

We attempted to control the sensitivity of nuclear emulsion plates in a timely manner using hydrogen hyper-sensitization. We created low-sensitivity films using emulsions containing only sulfur compounds, which have lower sensitivity compared to gold and sulfur sensitizers. The relative sensitivity of this sulfur-sensitized film compared to the standard film was 0.50, but after hydrogen hyper-sensitization, the relative sensitivity increased to 0.74, confirming for the first time the sensitivity-enhancing effect of hydrogen hyper-sensitization on nuclear emulsion plates. Further research and development, including the suppression of fog and the exploration of desensitization methods, is expected to open new research areas utilizing nuclear emulsion plates.

1. はじめに

名古屋大学の独自技術である「原子核乾板を用いた素粒子/放射線イメージング計測」は、エジプト・ピラミッドの観測において未知の新空間を発見[1]するなどを筆頭に、近年急速に応用分野・適用範囲が広がりつつあり、極めて注目度の高い計測技術である。宇宙から降り注ぐ素粒子「ミュオン」を利用した大型構造物透視計測(ミュオンラジオグラフィ)は、社会インフラ点検、地下空洞調査などさまざまな計測対象への実証研究が進行しており、土木構造物や地盤の状態を早期に診断・把握し、社会インフラの長寿命化や維持管理に役立ち、安心・安全な暮らし、経済的な損失を抑えるなどの環境調和型で省エネルギーな社会作りに大きく貢献することが期待されている。

原子核乾板とは、写真フィルムの原理を用いた飛跡検出器である[2]。図1に原子核乾板による荷電粒子の飛跡の検出原理を示す模式図と、最小電離粒子飛跡の顕微鏡写真を示す。荷電粒子がゼラチン中に分散した臭化銀結晶を透過すると、電離によって潜像が形成され、写真現像後に光学顕微鏡で観察できる銀粒子に成長する。原子核乾板は、荷電粒子の通過経路を銀粒子の連なりとして3次元的にサブミクロンの分解能で記録でき、様々な素粒子・宇宙物理学研究で用いられてきた。

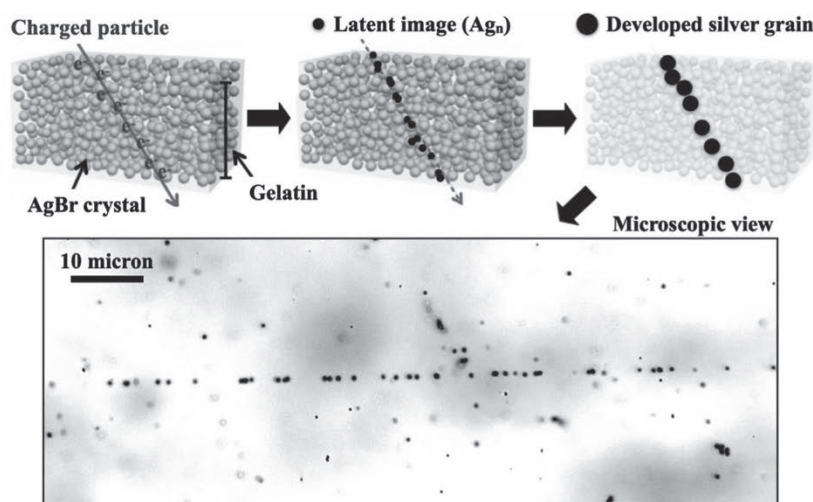


図1. 原子核乾板を用いた荷電粒子飛跡の検出原理を示す模式図と、最小電離粒子飛跡の顕微鏡写真(下画像)。[9]

本研究課題では、原子核乾板による素粒子・放射線イメージング計測をさらに高度化することを目指し、飛跡測定用光学顕微鏡の改良によって実現する高精度計測システム開発[3]および、原子核乾板自体にこれまでになかった機能を付加し新たな計測分野への適用を可能にするための研究開発を行なった。本論文では、後者について得られた成果について述べる。

原子核乾板は製造から現像までの間、全ての最小電離粒子の飛跡を記録し続けることから、使用期間・使用環境に制限がある。図2に示すように製造後の低感度の原子核乾板を任意のタイミングで増感・減感できれば、従来は難しかった火山の噴火、雷、太陽フレアなどの突発的に起きる稀な現象の観測や、月の資源探査のための放射線環境の計測など、新たな研究領域への適用が可能となる。このアイデアを実現するために著者は「水素超増感法」に着目した[4]。乾板を水素ガスに暴露させることで一時的に感度を上昇させる手法である。主に天体写真で用いたれた実績があり、光に対する増感効果は知られているが、荷電粒子に対しての応答は確認されていないため、水素超増感による原子核乾板の感度制御に関する基礎研究を行った[5,6,7,8]。

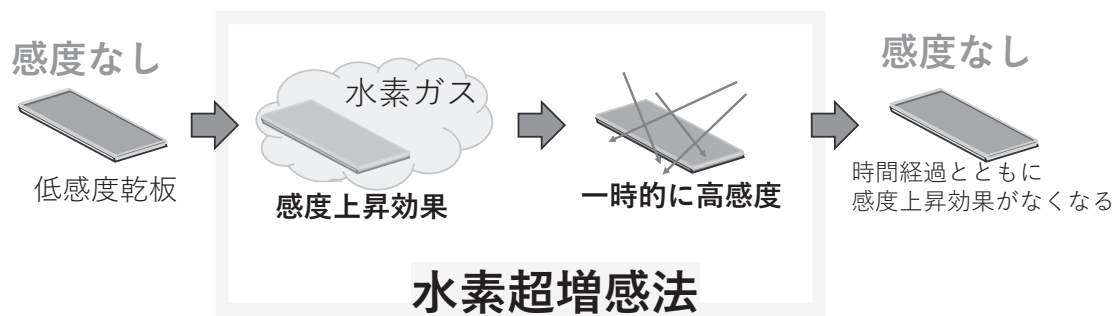


図2. 水素超増感法を用いた原子核乾板の適時感度制御のアイデア

2. 実験方法

2.1. 原子核乾板作製 名古屋大学において原子核乳剤(粒径200nmAgBrI結晶、ゼラチン体積割合65%)を作成した。乳剤状態での化学増感(硫黄増感のみ)を行い、ポリスチレンベース片面に乾燥膜厚20 μm となるよう塗布、乾燥を行い、低感度の原子核乾板を作成した[9]。

2.2. 水素超増感 作製した低感度の原子核乾板を圧力容器に入れ、0.05気圧下で2日間脱気処理を行い、その後、窒素+水素混合ガス(水素濃度2%)を容器内へ1.3気圧になるまで注入した。この圧力容器ごと恒温槽へ入れ、27度下で暴露処理を行った。暴露時間は0.5、1、2日間と条件を変えて行った。

2.3. ベータ線照射 乾板を容器から取り出し、ベータ線源(^{90}Sr)を30秒間密着させて照射した。照射直後に乾板は現像処理(現像、停止、定着、水洗)を行なった。

2.4. 測定 センシトメーターを用いて現像後の乾板の黒化度の測定を行なった。ベータ線照射部中央の黒化度を D_β 、未照射部の黒化度を D_{BG} とした。加えてノイズ(カブリ粒子の密度)を示すfog densityを測定した。 D_β から D_{BG} を差し引いた値をベータ線飛跡による黒化度とした。

3. 実験結果と考察

図3にベータ線飛跡に対する感度($D_\beta - D_{BG}$)とFog Densityの測定結果を示す。今回の硫黄増感のみの化学増感を施した原子核乾板は、金硫黄増感済みの原子核乾板乾板に比べ感度が半分(相対感度0.5、図3中第二縦軸として表示)となった。この乾板に暴露時間0.5日の水素超増感を施すと、相対感度が0.74へと上昇した。暴露時間をより伸ばした場合、感度のさらなる上昇は見られず、fogが上昇した。

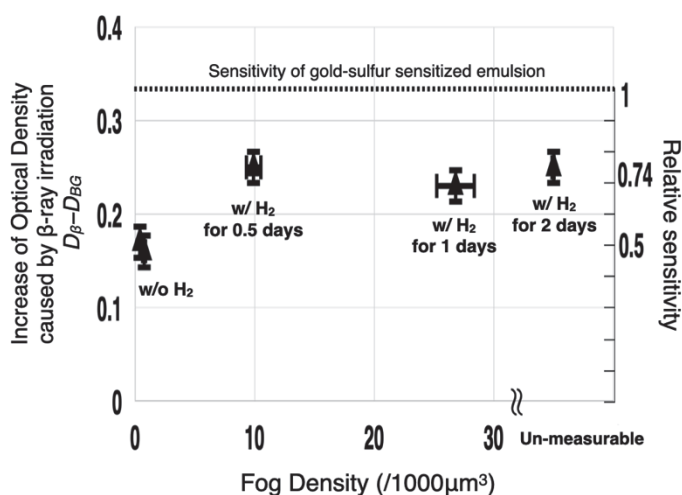


図3. 水素超増感を施した原子核乾板のベータ線飛跡に対する感度とFog densityの測定結果[11]

先行研究では、未化学増感乾板に水素超増感を施すと激しいfog増加が起こる一方で感度の上昇が観測されなかった[7]。今回、硫黄増感済み原子核乾板で初めて水素超増感による荷電粒子に対する感度上昇効果が観測された。これは結晶表面にできた Ag_2S が、水素暴露によって作られた Ag_2 を安定化させ、増感効果を促進したと考えられる[10]。

4. まとめ

原子核乾板による素粒子・放射線イメージング計測をさらに高度化することを目指し、水素超増感による原子核乾板の感度制御に関する基礎研究を行った。これまで原子核乾板で実績のなかった水素による超増感の荷電粒子に対する効果を確認する試験を行った。硫黄増感と組み合わせることで、原子核乾板の感度を上昇させる効果を初めて確認でき、水素超増感が原子核乾板の適時感度制御を実現する可能性を見出した。fogの抑制や減感方法の検討などのさらなる研究開発を進め、原子核乾板を用いた新たな研究領域の開拓を目指す。

謝辞

本研究は、名古屋大学 諫山雄大氏、山本紗矢氏、中村悠哉氏、長原翔伍氏、臼田育矢氏、安田伊吹氏との共同研究です。ここに記して感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] K. Morishima, et al., Nature 552 (2017) 386–390.
- [2] A. Ariga, et al., Nuclear Emulsions, Springer International Publishing, Cham, 2020, pp. 383–438.
- [3] I. Yasuda, et al., Poster presentation at The 6th KMI International Symposium (KMI2025), 5–7 May 2025, Nagoya University, JAPAN.
- [4] 谷忠昭, 日本写真学会誌 81 (2018),108–117.
- [5] 六條宏紀, 諫山雄大, 日本写真学会誌 86 (2023) ,426.
- [6] 諫山雄大, 六條宏紀 他, 日本写真学会誌 87 (2024),273.
- [7] 諫山雄大, 六條宏紀 他, 日本写真学会誌 88 (2025),59.
- [8] 諫山雄大, 名古屋大学 修士論文, 2025年
- [9] H. Rokujo et.al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 1066 (2024) 169622.
- [10] T.A.Babcock et al. Photogr. Sci, Eng., 19, (1975) 211–214
- [11] 六條宏紀, 諫山雄大 他, 2025年度日本写真学会年次大会, 2025年5月31日, 東京工芸大学 (予定)