

[22014]

有機色素化合物を用いた 3D 色素ゲル線量計の開発 Development of the 3D Gel Dosimeters based on the Organic Dyes

太刀川達也*, 吉岡雅俊, 早川堅登, 遠田拓海, 松島 大
Tatsuya Tachikawa*, Masatoshi Yoshioka, Kento Hayakawa, Takumi Onda, Dai Matsushima

Faculty of Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

Abstract

The color former was developed to visually detect radiation that is harmful to the human body but imperceptible to the human senses. Gel dosimeters using these color formers are useful for visual detection of irradiated areas of heavy ion beams used in cancer therapy. In this paper, we present the coloration behavior of the newly developed coupling-based aqueous dosimeters using *N,N*-diethyl-*p*-phenylenediamine upon gamma irradiation and the coloration of the organogel dye dosimeters containing the spiropyran analogue color former using new organogelators and the acid generators upon gamma irradiation.

Keyword: color former, dye dosimeter, hydrogel, organogel, hydrogelator, organogelator, phenothiazine, spiropyran

1. はじめに

1.1 研究背景

我々はγ線の照射を目視で確認するため、水溶液や有機溶媒中で数 Gy の低線量で発色するカラーフォーマーの開発研究を行ってきた[1-3]。癌治療に用いられる重粒子線の放射線量が 15 Gy 程度であることに着目し、本研究室で開発されている脂溶性・水溶性カラーフォーマーと、オルガノゲル・ヒドロゲル化剤を組み合わせることでオルガノゲル・ヒドロゲル色素線量計を作成し、発色能を評価することで、癌治療における重粒子線の照射線量の空間分布を目視により観測するための色素線量計を創製することが本研究の目的である。

癌治療においては、重粒子線の線量と照射範囲を決められた線量と患部の大きさに揃えるが、その修正がきちんとされているか、患部の大きさを超える範囲の空間を、狭い間隔で 1 点、1 点 照射、計測しておかなければならないため、長大な時間と照射回数が必要となっている。色素ゲル線量計が開発されることにより、一度に全面で線量を観測することができ、照射準備にかかるサイクロトロンの使用時間を大幅に短縮でき、より多くの患者に重粒子線を照射できるようになると考える。癌治療に用いられる放射線量の分布を一度に簡便に観測するための 3D 色素ゲル線量計の開発を目的とし、新しい水溶性カラーフォーマーや低分子ヒドロゲル化剤の開発に取り組む。

1.2 本年度の取り組み

前年度の研究[4]で、ヒドロゲル系色素ゲル線量計では、カラーフォーマーとして、フェノチアジン系カラーフォーマー **1** (図 1)、添加剤

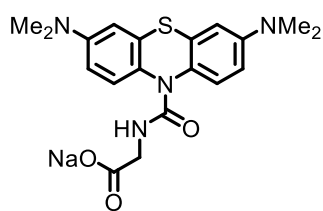


Figure 1. Color former 1

として硫酸鉄七水和物、ヒドロゲル化剤としてゼラチンや κ-カラギーナンを用いることで、炭素ビームで発色する色素ゲル線量計を作成することができた。図 2 に κ-カラギーナンゲルへの照射結果を示す。



0 30 60 120 s
(4 nA) (4 nA) (2 nA)

Figure 2. Images of κ-carrageenan hydrogel of **1** after $^{12}\text{C}^{5+}$ beam irradiation ($[\mathbf{1}]_0 = 0.13 \text{ mM}$, $[\text{Fe}^{2+}]_0 = 0.125 \text{ mM}$).

青色の発色は境界が明瞭で、粒子線による発色を目視で確認できることが伺えた。

一方で、ボロン酸エステル部位の開裂により発色するカラーフォーマー **2** (図 3) を用いた κ-カラギーナンヒドロゲル線量計 (図 4) では、炭素ビーム照射による発色が確認されたが、照射直後から発色体の拡散が見られ、発色の境界が不明瞭な結果が得られた。

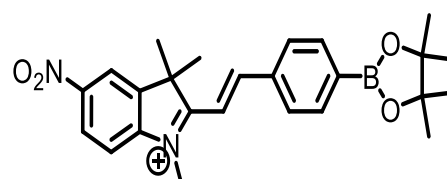


Figure 3. Color former 2

*tachikaw@apc.saitama-u.ac.jp

[22014]

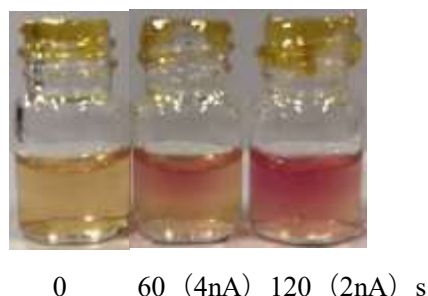


Figure 4. Image of κ -carrageenan gel of **2** after $^{12}\text{C}^{5+}$ beam irradiation ($[\mathbf{2}]_0 = 0.13 \text{ mM}$, $\text{pH} = 9.2$).

また、オルガノゲル線量計では、酸により発色するカラーフォーマー**3**とクロロホルムや四塩化炭素をゲル化できるオルガノゲル化剤**4**(図5)を用いて作製した四塩化炭素ゲル線量計においても、カラーフォーマー**3**の炭素ビームの照射による発色が見られた(図6)。

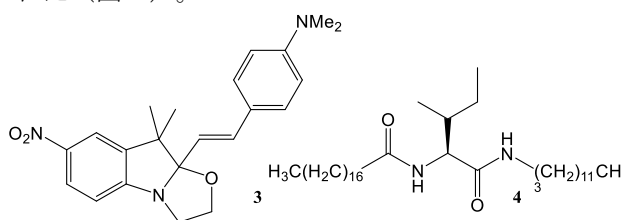


Figure 5. Color former **3** and organogelator **4**.

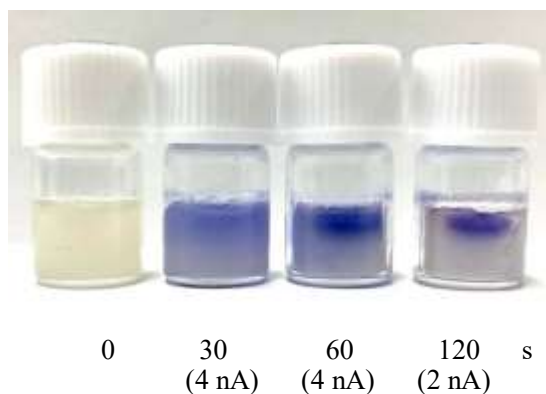


Figure 6. Image of dry tetrachloromethane gel of **3** after $^{12}\text{C}^{5+}$ beam irradiation ($[\mathbf{3}]_0 = 0.13 \text{ mM}$, $[\mathbf{4}]_0 = 107 \text{ mM}$).

そこで、本報告書では、新しい水溶性カラーフォーマーとして *N,N*-ジエチル-*p*-フェニレンジアミンを用いたカップリング系カラーフォーマーの開発を、オルガノゲル系カラーフォーマーでは、有害な特定化学物質であり、揮発性を有するクロロホルムや四塩化炭素の代替としてジフェニルヨードニウム塩やトリフェニルスルホニウム塩の光酸発生剤を放射線によるカラーフォーマーの発色の増感剤として検討した結果について報告する。

カップリング系カラーフォーマーには、将来的にフェニレンジアミン類とヒドロゲル化剤とがカップリングできるようにすることで、放射線照射で生じた発色体の拡散を阻止できることが期待される。光酸発生剤の利用には、今までにハロゲン系溶媒が用いられてきたオルガノゲル線量計を、より安全なものにできる。

また、重粒子線 ($^{12}\text{C}^{5+}$) 照射実験においては、前回の結果 [4] を踏まえ、ヒドロゲル線量計では、水溶性フェノチアジン系カラーフォーマーのヒドロゲル線量計に添加剤として POD 添加を新たに試みた。オルガノゲル線量計では、スピロピラン類似カラーフォーマー**3**に換えてヒドロゲル系で検討しているフェノチアジン系カラーフォーマーの脂溶性のものについて検討した。

2. *N,N*-ジエチル-*p*-フェニレンジアミンを用いたカップリング系カラーフォーマー

2.1 研究背景

我々の研究において、水溶性カラーフォーマーのひとつとしてカップリング系カラーフォーマーが用いられてきた。放射線が水などの媒体に照射されると過酸化水素が生成されることに着目し、過酸化水素により、アニリン類、エーテル類の試薬と4-アミノアンチピリンなどのカプラー試薬とが反応し色素体が生成することを利用する(図7)。

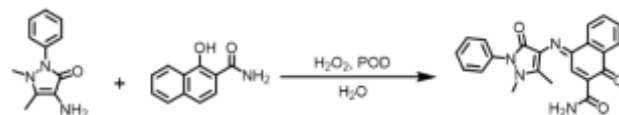


Figure 7. Coupling between 4-aminoantipyrine and 1-naphthol derivative by H_2O_2 organogelator **4**.

現在までにいろいろなカップリング試薬を検討してきたが、過酸化水素ではよく発色する系も、ガンマ線照射においては、生成した色素体が分解するか照射後の発色体の強度が弱く、よい検出系は得られなかった。そこで、本研究では、カラー写真に用いられる *N,N*-ジエチル-*p*-フェニレンジアミンとカプラーとの反応を放射線検出に応用することとした。

本研究では、4種類のフェニレンジアミン類と6種類のナフトール系、ナフトールアミン系カプラー類を合成し、過酸化水素の添加やガンマ線による照射による発色を検討した。本報告では、よい発色を示した *N,N*-ジエチル-*p*-フェニレンジアミン硝酸塩**5**と1-ナフトール系カプラー**6**との結果を中心に示す。

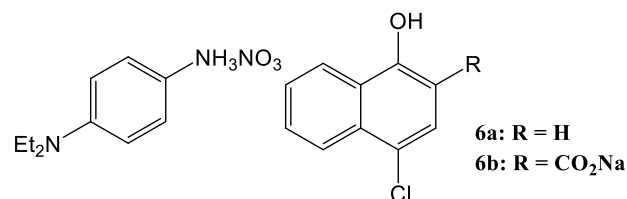


Figure 8. *N,N*-diethyl-*p*-phenyldiamine **5** and 1-naphthol derivative **6a,b**.

[22014]

2.2. 過酸化水素添加実験

N,N-ジエチル-*p*-フェニレンジアミン硝酸塩 **5** と 4-クロロ-1-ナフトール **6a** について、過酸化水素添加による反応性を評価した。

まず、単体の *N,N*-ジエチル-*p*-フェニレンジアミン硝酸塩 **5** と酸化の効率を良くすることが知られているペルオキシダーゼ (POD) の蒸留水溶液を調製し、過酸化水を添加した。添加直後の溶液の様子を図9 (a)、24時間後の様子を(b)に示す。それぞれ過酸化水素を添加していないサンプル瓶を左側、添加後のサンプル瓶を右側に示してある。過酸化水素の添加直後に溶液は赤色に発色したが、24時間後には薄紫色に退色していた。



(a) right after (b) 24 hours later

Figure 9. Images of aqueous solution of **5** after H₂O₂ addition ([**5**]₀ = 0.38 mM, [POD]₀ = 0.40 μM, [H₂O₂]₀ = 100 μM).

これは、過酸化水素で酸化されて生成したキノジイミン (QDI) の反応性が高く不安定であるため、QDI同士が反応して ODI の赤色が消失し、液色が薄青色変化したと考えられる。よって、この溶液にカップラーとして 4-クロロ-1-ナフトール **6a** を共存させることによりカップリング反応が進行し、発色することが期待される。そこで、**5** と **6a** を溶かした水溶液に過酸化水素を添加した (図 10)。その結果、添加直後には QDI の赤色が見られたが、3時間後に **6a** を添加していない場合と同じように溶液は薄青色に変化した。



(a) right after (b) 3 hours later

Figure 10. Images of aqueous solution of **5** and **6a** after H₂O₂ addition ([**5**]₀ = 0.72 mM, [**6a**]₀ = 0.32 mM, [POD]₀ = 0.40 μM, [H₂O₂]₀ = 100 mM).

ここで、図 9(a)の左のサンプルが薄赤色なのに図10.(a)左のサンプルが無色なのは、図 9 では溶存酸素

の影響で微量の QDI が生成して薄赤色に発色しているのに対し、図 10 では **6a** が存在していることで溶存酸素により生成した QDI が消費され、無色になっていると考えられる。

図10.の過酸化水素添加 3 時間後の溶液の青色は、色素体が生成しているにしては薄過ぎるため、QDI がカップラーである **6a** と反応せずに失活していると考えられる。フェノール類への芳香族求電子置換反応は、溶液の液性がアルカリ性であると速く進行することが知られている。そこで、溶液に炭酸水素ナトリウムを適量加え、溶液の液性を中性から弱アルカリ性にして過酸化水素を添加した (図 11)。



right after

Figure 11. Images of aqueous solution of **5** and **6a** after H₂O₂ addition ([**5**]₀ = 0.72 mM, [**6a**]₀ = 0.32 mM, [POD]₀ = 0.40 μM, [NaHCO₃]₀ = 0.32 mM, [H₂O₂]₀ = 100 μM).

その結果、過酸化水素添加直後に溶液は青色に変化し、弱塩基性の条件では過酸化水素によるカップリング反応が迅速に進行し色素体が生成していることがわかった。この溶液では、以下の反応が進行しているものと考えられる (図 12)。

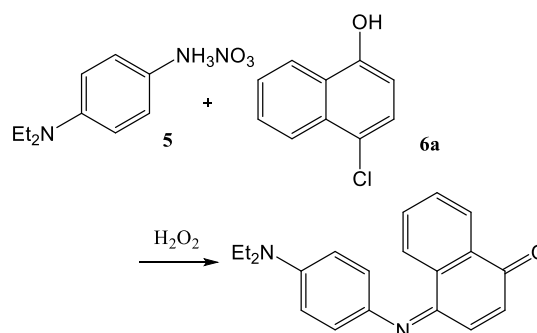


Figure 12. Coupling reaction between *N,N*-diethyl-*p*-phenyldiamine **5** and 4-chloro-1-naphthol **6a**.

水酸基の代わりにアミノ基をもつナフチルアミン系カップラーでは、このような液性を塩基性にするによる反応の変化は起こらないことから、炭酸水素ナトリウム添加による液性の変化によりカップリング反応が迅速化されたことが確認できる。

以上のことから、溶液の液性を弱アルカリ性にし、フェニレンジアミン類とナフトール系カップラー類を用いた水溶液系線量計に対しガンマ線照射実験を行うこととした。

[22014]

2.3 ガンマ線照射実験

N,N-ジエチル-*p*-フェニレンジアミン硝酸塩 **5** と 2 位にカルボン酸部位をもつ 4-クロロ-1-ナフトール類 **6b**、炭酸水素ナトリウム、POD を溶かした水溶液に 100 Gy/h の線量率で 10, 40, 70 Gy の γ 線を照射した試料の様子を図 13 に、その溶液の吸収スペクトル変化を図 14 に示す。

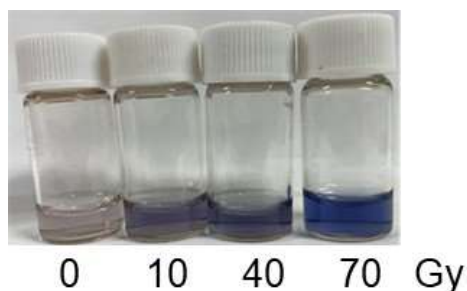


Figure 13. Images of aqueous solution of **5** and **6b** after γ irradiation ($[5]_0 = 0.72$ mM, $[6b]_0 = 0.32$ mM, $[POD]_0 = 0.40$ μ M, $[NaHCO_3]_0 = 0.32$ mM).

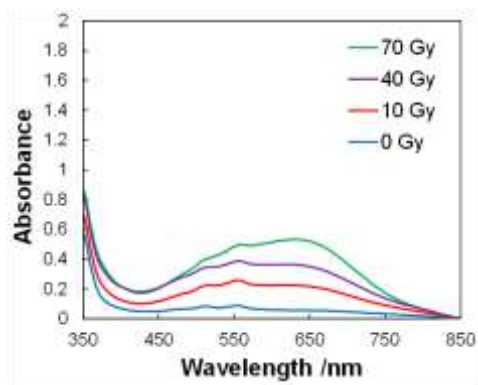


Figure 14. Spectral change of aqueous solution of **5** and **6b** after γ irradiation ($[5]_0 = 0.72$ mM, $[6b]_0 = 0.32$ mM, $[POD]_0 = 0.40$ μ M, $[NaHCO_3]_0 = 0.32$ mM).

照射線量の増加により溶液は青色に発色し、10 Gy の照射線量から目視で溶液の発色の確認が可能であった。今後、この系をヒドロゲル系に応用することで粒子線検出に利用可能であると考えられる。また、低分子ヒドロゲル化剤カプラーを合成し、ヒドロゲル線量計を作製することで、ゲル中で生成した色素体が拡散しないヒドロゲル線量計の創製を目指す。

3. 不揮発性の酸発生剤を用いたオルガノゲル色素線量計の開発

3.1 研究背景

我々は、放射線の照射により、カラーフォーマーに作用する活性種であるラジカルや酸が発生しやす

いことから、クロロホルムや四塩化炭素を媒体としたオルガノゲル色素線量計の開発を行ってきた。それらの中には良い発色を示すものもあるが、クロロホルムや四塩化炭素は環境負荷が大きく、特定化学物質かつ特別管理物質となったクロロホルムの使用を抑えることは急務である。

そこで、媒体中にカラーフォーマー発色のための活性種を発生させる増感剤として、光酸発生剤を利用することで、クロロホルムや四塩化炭素より有害性の少ないエタノールやアセトン、酢酸エチルなどを溶媒としたオルガノゲル線量計を構築することを研究の目標とした。カラーフォーマーとしては酸により発色するスピロピラン類似型カラーフォーマー **2** を用いた。また、実験に用いた光酸発生剤 **X** と **Y** の構造を図 15 示す。

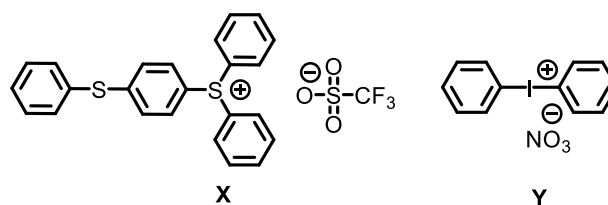


Figure 15. Photoacid generators **X** and **Y**.

まず、溶液で色素線量計を作製し、溶媒と増感剤の検討を行った。

3.2 溶液線量計へのガンマ線照射実験

ゲル線量計での検討を行う前に溶液線量計でのガンマ線照射実験を行った。ガンマ線は ^{60}Co を線源として、100 Gy/h で 6 分間、24 分間、42 分間の照射を行い、それぞれ 10Gy、40Gy、70Gy の照射線量とした。

まず、トリアリールスルホニウム塩系酸発生剤 **X** を用いた結果を示す。カラーフォーマー **2** を 0.13 mM、**X** を **2** の 25 当量である 3.25 mM になるよう溶液を調製した。酸発生剤 **X** は、エタノール、2-プロパノールに対して溶解せず、酢酸エチル、THF、アセトニトリル、アセトン溶液を調製し、ガンマ線照射実験を行った。その結果、全ての溶液で照射線量の増加による発色体の吸光度の増加が見られたが、アセトンを溶媒として用いた場合のみ 10 Gy から目視による発色を確認することができた (図 16)。



Figure 16. Images of acetone solution of **2** and **X** after γ irradiation ($[2]_0 = 0.13$ mM, $[X]_0 = 3.25$ mM).

[22014]

ジフェニルヨードニウム塩酸発生剤 **Y** はエタノールや 2-プロパノールにも溶解したが、それらの溶液はガンマ線照射をしなくても発色した。**X** の場合と同じ濃度、同じ条件でガンマ線を照射したところ、酢酸エチルや THF 溶液では、70 Gy までのガンマ線を照射してもほとんど液色に変化は見られず、アセトニトリル溶液で最も発色し、10 Gy から目視で発色を確認することができた (図 17)。

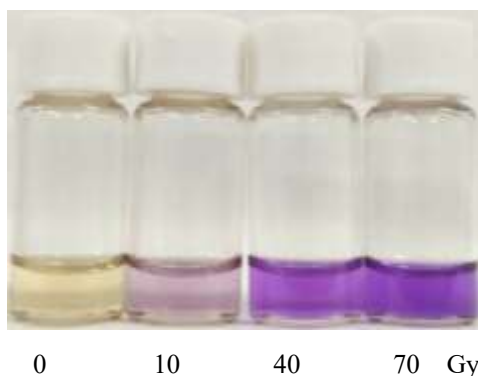


Figure 17. Images of acetonitrile solution of **2** and **Y** after γ irradiation ($[2]_0 = 0.13$ mM, $[X]_0 = 3.25$ mM).

以上のことから、増感剤としてジフェニルヨードニウム塩酸発生剤である **Y**、溶媒としてアセトニトリルを用いて色素ゲル線量計を作製することとした。

3.3 溶液線量計へのガンマ線照射実験

色素ゲル線量計を作製するオルガノゲル化剤として、アセトニトリルをゲル化することのできるオルガノゲル化剤 **7a-c**、**8** を用いることとした (図 18)。

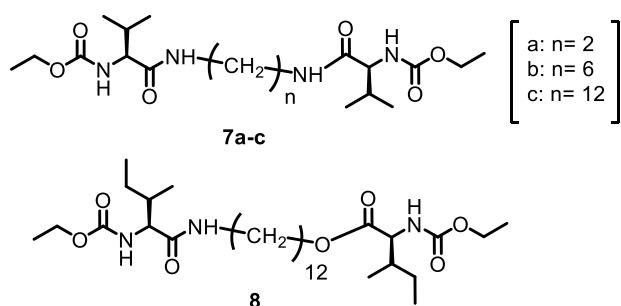


Figure 18. Organogelators **7a-c** and **8**

ゲル化剤の濃度は最小ゲル化濃度を基準に $[7a]_0 = 13.6$ mM, $[7b]_0 = 18.5$ mM, $[7c]_0 = 5.5$ mM, $[8]_0 = 7.9$ mM と決定した。カラーフォーマー **2** の濃度は溶液のときと同じ 0.13 mM、増感剤 **Y** の濃度は **2** の濃度の 75 当量である 9.75 mM を用いた。それぞれの色素ゲル線量計に、溶液のときと同じ様に 10, 40, 70 Gy のガンマ線を照射した。その結果、ゲル化剤として **7b**、**7c** を用いた場合は余り発色が見られず、**7a**、**8** を用いた場合色素ゲル線量計はよく発色し、それぞれ 40 Gy の照射から目視で発色が確認できた (図 19, 20)。

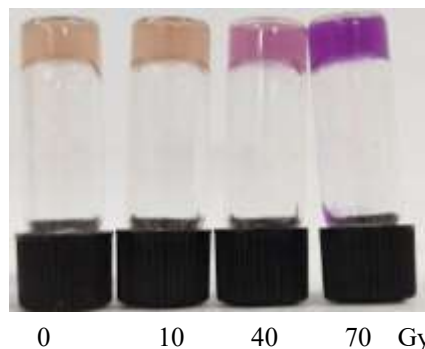


Figure 19. Images of acetonitrile-**7a** gel of **2** and **Y** after γ irradiation ($[2]_0 = 0.13$ mM, $[Y]_0 = 0.95$ mM, $[7a]_0 = 13.6$ mM).

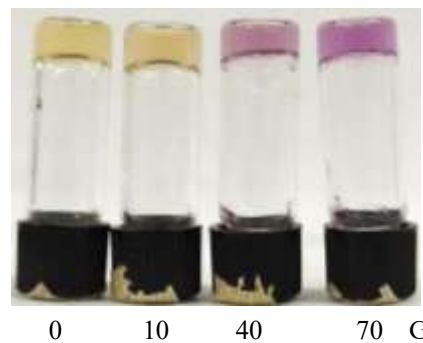


Figure 20. Images of acetonitrile-**8** gel of **2** and **Y** after γ irradiation ($[2]_0 = 0.13$ mM, $[Y]_0 = 0.95$ mM, $[8]_0 = 7.9$ mM).

カラーフォーマーと増感剤の種類と濃度、溶媒の種類はそれぞれの色素ゲル線量計で同一であるため、それぞれの線量計で発色に違いが現れたのは、ゲル化剤のゲル中での会合状態が異なっているためであると推測した。アルキル鎖の短い **7a** と中央のアルカン部分が高い **8** でよい発色がみられたのは、**7a** と **8** はゲル化剤同士の会合性能が高く、ゲル中で高い会合状態が維持され、溶質であるカラーフォーマー **2** と増感剤 **Y** はゲル化剤分子とは隔離され、ゲル化剤分子で囲まれた反応場に存在していることから反応しやすくなっていると考えた (図 21(a))。一方で、アルキル鎖の長さが中途半端でゲル化能が余り高くない **7b** では **7b** 同士の会合性能が低く、ゲルは形成するものの **7b** は無秩序に配列しており、カラーフォーマーや増感剤分子は乱雑に会合した **7b** 分子間に取り込まれ易く、カラーフォーマーと増感剤から生成される活性種との反応性が低くなったと考えた (図 21(b))。

[22014]

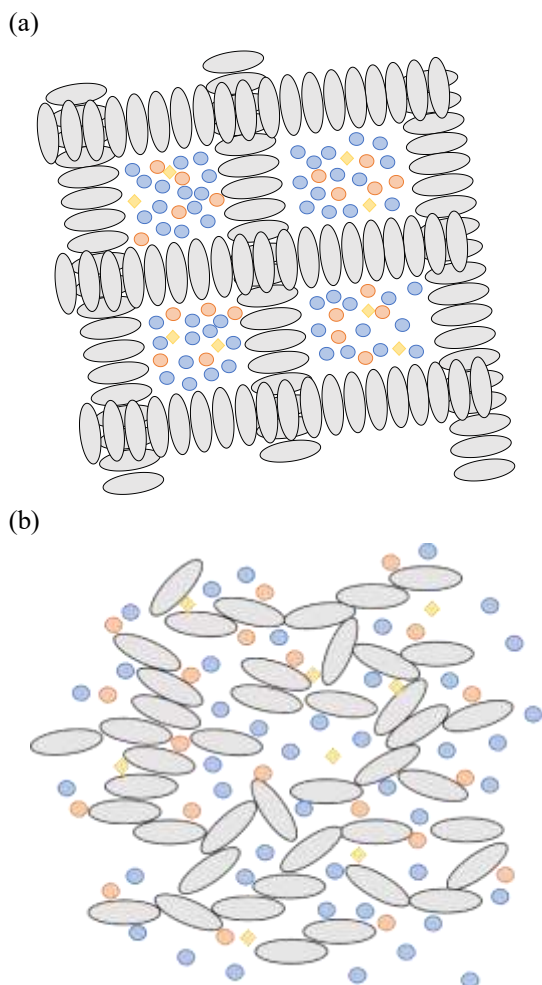


Figure 21. Images of gel dosimeter, (a) well-ordered gel and (b) disordered gel.

以上のことから溶媒としてクロロホルムや四塩化炭素を用いないオルガノゲル色素線量計を創製することができた。今後は、重粒子線照射実験を行っていく予定である。

4. 色素ヒドロゲル線量計、オルガノゲル線量計への重粒子線（炭素ビーム）照射

4.1 研究背景

はじめにの項で述べたように、前年度の研究で重粒子線照射に対して良く発色したヒドロゲル線量計について、フェノチアジン系カラーフォーマー**1**に類似したカラーフォーマー**9**と添加剤として硫酸鉄七水和物、ペルオキシダーゼの有用性についてゼラチンゲルにおいて検討した。一方、オルガノゲル線量計については、スピロピラン類似カラーフォーマー**2**では明瞭な発色が見られたが、本研究室で最も研究されており、ヒドロゲル線量計では良い発色が

得られたフェノチアジン系カラーフォーマーの脂溶性類縁体**10**を用いて重粒子線照射実験を行った。本研究で用いたカラーフォーマーの構造を図22に示す。

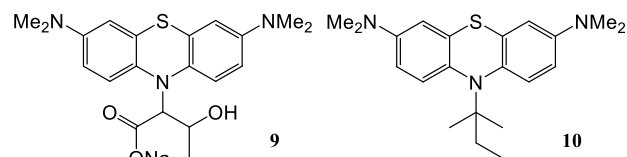


Figure 22. Water-soluble colorformer **9** and water-insoluble colorformer **10**.

4.2 ヒドロゲル線量計への重粒子線照射実験

カラーフォーマー**9**を0.13 mMの濃度になるように水に溶解させ、硫酸鉄七水和物はカラーフォーマーの5当量である0.65 mM、PODは触媒量である0.40 μMになるように加えた水溶液をそれぞれ作成し、溶液0.5 mlにゼラチン60 mgを加えて60℃に加熱して溶かし、室温まで冷却することで蒸留水ゲル線量計を作製した。220 MeVの炭素線($^{12}\text{C}^{5+}$)を7.5 cm×7.5 cmの範囲でスキャンし、4 nAで30秒と60秒、2 nAで120秒照射した。4 nAで60秒と2 nAで120秒は線量率の違いが発色に与える影響を調査するために行った。4 nAで30秒の照射は約9 Gy、4 nAで60秒、2 nAで120秒の照射は約18 Gyに相当する。カラーフォーマーのみの結果を次の頁の図23(a)に、増感剤として硫酸鉄七水和物を加えた結果を(b)に、PODを加えた結果を(c)に示す。

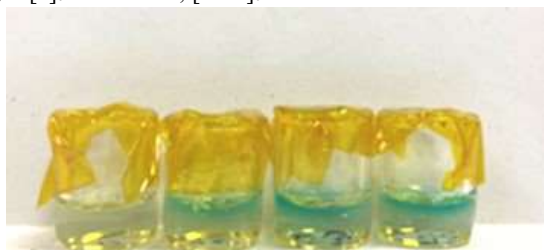
増感剤の添加がない(a)では発色は小さく、(b)や(c)では発色が見られることから、硫酸鉄やPODを増感剤として加えることで発色が大きく明瞭になることが明らかとなった。また、今回の照射から、カラーフォーマーの構造が多少変化しても重粒子線による発色がみられることもわかった。(c)に見られるように、PODを添加した場合は、未照射時の線量計の発色が多少見られ、また、発色も大きくなった。フェノチアジン系カラーフォーマーの水溶液でのガンマ線照射の場合、硫酸鉄の添加でカラーフォーマーの発色が増感されるが、PODの添加では液性を弱酸性にししないと増感されない。これは、PODによる酸化を溶媒と電子が阻害するためと考えてきたが、重粒子線の場合は中性溶液でも増感されることから、ガンマ線と粒子線の作用の違いが明らかとなった。

[22014]

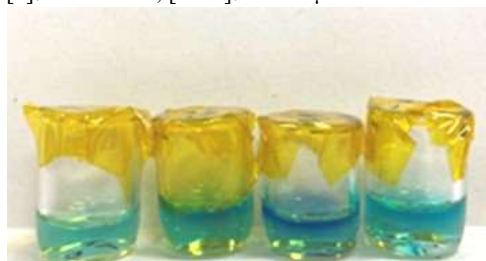
(a) $[9]_0 = 0.13 \text{ mM}$



(b) $[9]_0 = 0.13 \text{ mM}, [\text{Fe}^{2+}]_0 = 0.65 \text{ mM}$



(c) $[9]_0 = 0.13 \text{ mM}, [\text{POD}]_0 = 0.40 \mu\text{M}$

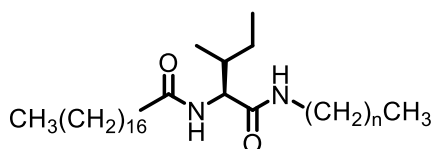


0 30 60 120 s
(4 nA) (4 nA) (2 nA)

Figure 23. Images of gelatin gel of **9** after $^{12}\text{C}^{5+}$ beam irradiation.

4.3 オルガノゲル線量計への重粒子線照射実験

オルガノゲル線量計では、カラーフォーマー**10**とオルガノゲル化剤**11**を用いて、アセトンゲル、アセトンに増感剤として四塩化炭素を10.当量加えたゲル、塩化メチレンゲルについて重粒子線照射を行った。オルガノゲル化剤**11**の構造は図24に示す。溶媒の種類により安定なゲルが得られるゲル化剤が異なるため、前回のスピロピラン類似カラーフォーマーに用いたゲル化剤とはアルキル鎖長が異なっている。



11a: $n = 5$, **11b**: $n = 17$

Figure 24. Organogelator **11a,b**

カラーフォーマー**10**を0.25 mMの濃度になるよう

にアセトンや塩化メチレンに溶解させ、その溶液にゲル化に適する量のオルガノゲル化剤**11a**あるいは**11b**を加熱溶解させ、溶液を室温まで冷却することでオルガノゲル色素線量計を作製した。

炭素イオンビームの照射条件はヒドロゲル化剤の場合と同じで、220 MeVの炭素線 ($^{12}\text{C}^{5+}$)を7.5 cm × 7.5 cmの範囲でスキャンし、4 nAで30秒と60秒、2 nAで120秒照射した。

アセトンゲル線量計の結果を図25の(a)に、増感剤として四塩化炭素をカラーフォーマーの10当量加えたアセトンゲル線量計の結果を(b)に、溶媒を塩化メチレンに換えて作製した塩化メチレンゲル線量計の結果を(c)に示す。

(a) $[10]_0 = 0.25 \text{ mM}, [11a] = 22 \text{ gL}^{-1}$



(b) $[10]_0 = 0.25 \text{ mM}/\text{CCl}_4 = 10 \text{ eq.}, [11a] = 22 \text{ gL}^{-1}$



(c) $[10]_0 = 0.25 \text{ mM}, [11b] = 28 \text{ gL}^{-1}$



0 30 60 120 s
(4 nA) (4 nA) (2 nA)

Figure 25. Images of (a,b) acetone-**11a** gel and (c) dichloromethane-**11b** gel of **10** after $^{12}\text{C}^{5+}$ beam irradiation.

図25(a)より、アセトンゲルにおいては重粒子線の照射でほとんど発色していないことがわかる。このことからアセトンゲルからはカラーフォーマーの発色に必要なラジカルなどの活性種の生成が少ないことがわかった。一方で、(b)からわかるように四塩化炭素のように分解して活性種を出しやすい化学種が

[22014]

少量でもあると発色が大きくなった。また、(b)では、図 2 や図 23(b),(c)の画像とは異なり、ゲルの下の方まで発色している。これらの画像は粒子線照射直後に撮影されたものであり、粒子線が届くのはゲルの表面から 2 mm 程度であると計算されていることから、この線量計では、発色体がゲル中を拡散しやすいことがわかる。活性種が多く生成する塩化メチレンゲルでは余り発色が見られなかった。今後は拡散しにくいゲル化剤の濃度やゲル化剤分子やカラーフォーマー分子を拡散しにくい構造にすることで、発生した色素体がゲル中を拡散しないようにすることが期待される。

参考文献

- [1] 太刀川達也, 「放射線を視覚で検知するための機能性色素材料」・放射線物質対策技術-除去、モニタリング・装置・システム開発-, 株式会社エヌ・ディー・エス, pp. 249-257, 2015, 太刀川達也 「放射線量を色で把握」・Isotope News、731(3), PP.7-11, 2015.
- [2] Tachikawa T., Sato Y. and Tokita S., Synthesis and Radiation Sensitivity of Phenoxazine Type Color Formers Including Thiol Ester Protective Group, Mol. Cryst. Liq. Cryst., 431, pp. 461-466 (2005). 太刀川達也,
- [3] 太刀川達也, 「放射線検出のためのカラーフォーマーゲル化剤」, ゲルの安定化と機能性付与・次世代への応用開発, 技術情報協会, pp. 111-116, 2013., H. Itoi, Y. Sekine, M. Sekiguchi, and T. Tachikawa, "A Novel Color Former Organogel for Radiation Detection Systems", Chem. Lett., 38, 1002-1003, 2009.
- [4] 太刀川達也, 藤田智哉, 網島大紀, 山田琴美, 飯嶋亮樹, 小泉知恵, 2021 年度 日本原子力研究開発機構・量子科学技術研究開発機構 施設利用共同研究 一般共同研究 成果報告書, 2022.