

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12500

研究課題名（和文）光スペクトルの赤方偏移に基づく放射線検出技術

研究課題名（英文）Radiation detection method based on the redshift of the optical spectrum

研究代表者

堤 康宏（Tsutsumi, Yasuhiro）

近畿大学・理工学部・講師

研究者番号：50734943

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：シンチレーション光の光スペクトル変化に基づいた放射線位置検出法を提案し、その原理実証を行った。提案法は、シンチレーション光をシンチレーションファイバの伝送損失の大小での2つの波長域に分離してシリコン光電子増倍管で検出し、2つの光電子増倍管の出力信号比から光スペクトルの赤方偏移の度合いを評価することにより、位置を検出する方法である。原理確認実験により、Sr90のベータ線源の位置検出が可能であること示した。また、提案測定法では信号対雑音比の改善のため、同時測定を行う。同時測定のしきい値に測定結果が依存することを示し、しきい値が提案測定法において重要なパラメータになることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

20フォトン程度の微弱なシンチレーション光の光スペクトルの変化を評価し、線源位置を検出可能であることを明らかにした。ダイクロイックミラーは光の波動性に基づいた素子であるが、光量が極端に少ない場合でも多数回測定し平均化することで、光量が多い場合と同様に機能することが明らかになった。さらに、信号到達時期が不明な微弱光の測定において同時測定を行うが、信号の有無を判定するしきい値が測定結果に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。本測定法はファイバ片端に装置を集約でき、設置時の制約が緩和される。このことから、人体内に挿入する線量計や核物質貯蔵庫周辺の広範な線量モニタリング等の応用への発展を期待する。

研究成果の概要（英文）：A radiation position sensing method based on the red-shift of scintillating light is proposed and demonstrated. In this method, photon flux is split into two wavelength ranges, one with large transmission losses and the other with small transmission losses. Each split photon flux is detected by a silicon photomultiplier. The position is detected by evaluating the degree of red-shift of the optical spectrum from the output signal ratio of the two silicon photomultipliers. A proof-of-principle experiment showed that the position of Sr90 beta radiation sources can be detected by proposed method. The proposed method uses coincidence measurements to improve the signal-to-noise ratio. It is clarified that the measurement result depends on the threshold value of the coincidence measurement and that the threshold value is an important parameter in the proposed measurement.

研究分野：量子ビーム科学関連

キーワード：放射線検出 微弱光検出 光スペクトルの赤方偏移 位置検出器

1. 研究開始当初の背景

ファイバ型放射線モニタは、細く、柔軟に曲げることができるため、複雑な構造の人体内に挿入して利用する線量計等への応用が有望視されている。位置検出が可能な従来のファイバ型放射線モニタは飛行時間法に基づいている。しかし、ファイバの両端に検出器を配置する必要があり、設置時の制約が大きいため、その応用に制限がある。一方、赤方偏移に基づくファイバ型位置検出では、片側読み出しが可能となり、種々の応用へ期待できる。しかし、放射線により生じる微弱なシンチレーション光の光スペクトル変化に基づいた測定法は、これまでほとんど検討されておらず、「放射線検出のため、どこまで微弱な光で光スペクトルの赤方偏移を検出ができるか」という学問的問いの下、研究を開始した。

2. 研究の目的

シンチレーション光スペクトルの赤方偏移に基づくファイバ型位置検出技術を用いて、放射線位置検出器の動作を実証することを目指す。この方法では、放射線により発生したシンチレーション光がシンチレーションファイバを伝搬する距離が長いほど、その光スペクトルが赤方偏移することを利用し、放射線入射位置を検出する技術である。

まず、シンチレーションファイバでのシンチレーション光の伝搬光モデルを作成し、伝搬距離とシンチレーション光スペクトル変化の関係を理論的に明らかにする。次に、シンチレーション光の光スペクトル変化を検出する方法を開発する。放射線により生じるシンチレーション光は微弱であるため、光利用効率の高い新たな光学系を提案する。そして、放射線位置検出の実証実験を行う。提案した光学系により、伝搬距離とシンチレーション光の光スペクトル変化の関係を実験的に明らかにし、位置検出可能であることを示す。

3. 研究の方法

(1) シンチレーションファイバでのシンチレーション光の伝搬光モデルの作成

蛍光体を含んだ導光体中での蛍光伝搬モデルをベースに、シンチレーションファイバにおけるシンチレーション光スペクトルの伝搬距離特性を計算するモデルを作成した。また、蛍光材料とチューブを用いてシンチレーションファイバを自作し、ファイバ端でのシンチレーション光の光スペクトル分布を実測し、提案モデルによる計算結果と比較した。

(2) 微弱なシンチレーション光の光スペクトル変化を検出する方法の開発

微弱なシンチレーション光の光スペクトル変化を検出するためには、波長による分光数を最小にとどめ、かつ、高感度な受光器を用いる必要がある。そこで、シンチレーション光を伝送損失の大小での2つの波長域に分離して高感度な光検出器で検出し、2つの光検出器の出力信号比から光スペクトルの赤方偏移の度合いを評価することで位置検出を試みた。また、測定の信号対雑音比を改善するため、同時に2つの光検出器で信号を検出したときのみ測定する同時測定を採用した。放射線を模した紫外線レーザーの位置を変えながらシンチレーションファイバに入射し、レーザーの入射位置検出の可否を確認した。

(3) 放射線位置検出の実証実験

Sr90の放射性同位体の位置を変えながらシンチレーションファイバにベータ線入射し、提案構成により、放射性同位体の位置検出の可否を調べた。また、同時測定のためのしきい値を変えて測定を行い、しきい値が位置検出に及ぼす影響について調べた。

4. 研究成果

(1) シンチレーションファイバでのシンチレーション光の伝搬モデルの作成

熱収縮チューブ、紫外線硬化樹脂、蛍光材料 Lumogen F Red 305 で作製したシンチレーションファイバの実測光スペクトルと提案モデルにより計算した結果がよく一致することを明らかにし、提案モデルの妥当性を明らかにした。さらに、シンチレーションファイバ中での自己吸収と再発光を無視することで、シンチレーション光強度の距離分布が簡単な指数関数の近似解で表されることを明らかにした。

(2) 微弱なシンチレーション光の光スペクトル変化を検出する方法の開発

図1に実験で使用した赤方偏移に基づく位置検出器の構成を示す。波長分離のためにカットオン波長 505 nm のダイクロイックミラーを用い、高感度の光検出器としてシリコン光電子倍增管(SiPM)を利用した。シンチレーションファイバにはクラレ社製の SCSF-78 を用いた。位置検出のための指標 E を(短波長光子を検出した SiPM の信号電圧波高値)/(両 SiPM の信号電圧波高値の和)で定義した。図2にレーザー入射位置と指標 E の関係を示す。丸点は実測値であり、線は2次の近似曲線である。レーザー入射位置に対して指標 E は単調に変化しており、指標 E から位置検出可能であることがわかった。

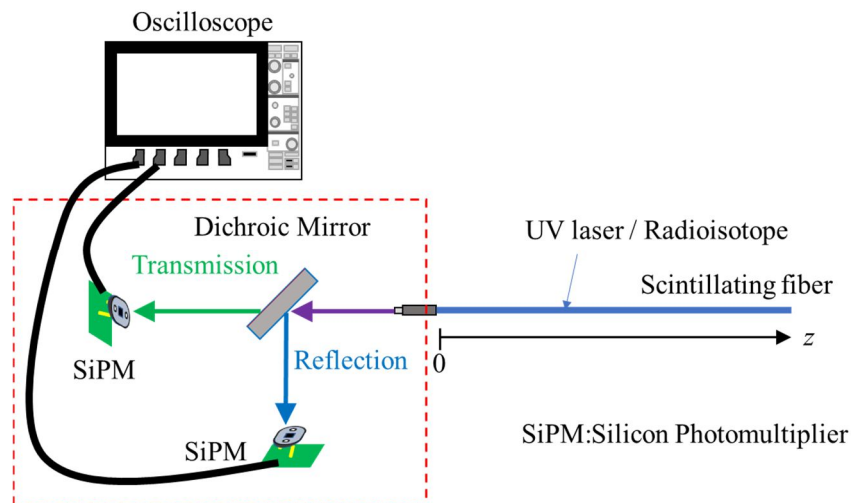


図1 赤方偏移に基づく位置検出器の構成

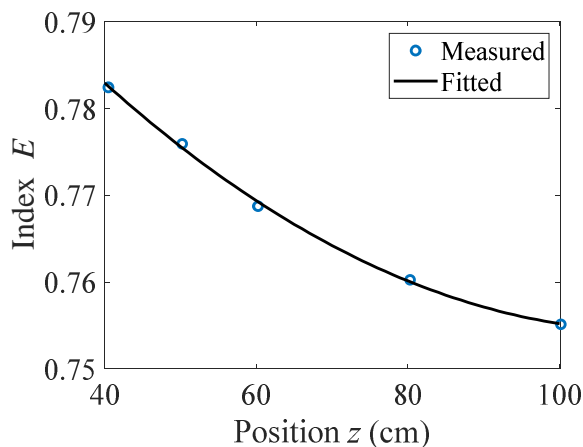


図2 レーザ入射位置と指標 E の関係

(3) 放射線位置検出の実証実験

図3に放射性同位体の位置と指標 E の関係を示す。指標 E はしきい値 TH に強く依存していることがわかった。しかし、同一のしきい値 TH では、放射性同位体の位置に対して指標 E は単調に変化しており、しきい値を固定して測定を行うことで指標 E から位置検出可能であることが明らかになった。指標 E のしきい値依存性は、同時測定により、両 SiPM の信号電圧波高値がしきい値を超えない測定データが破棄されているため生じている。SiPM に到達する光子数に対してしきい値が大きいほど破棄するデータの影響が大きくなり、指標 E のしきい値への依存性が高まる。したがって、本測定法のように微弱光を同時測定により検出する際には、検出器への到達光子数としきい値の関係が重要になることも示唆された。

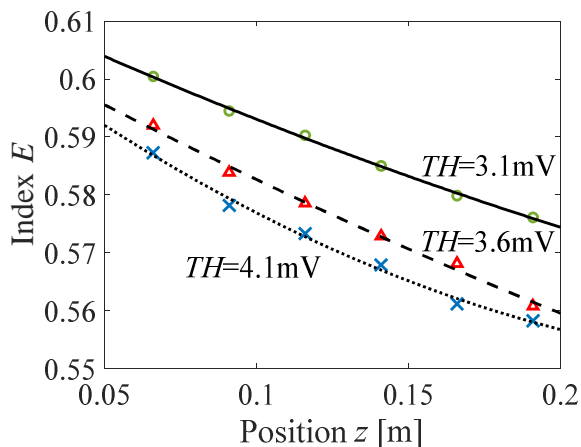


図3 Sr90 の放射性同位体の位置と指標 E の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ojima Yoshinobu, Hamasaki Takuya, Tsutsumi Yasuhiro, Fujieda Ichiro	4. 巻 48
2. 論文標題 Position detection of a beta particle emitter by utilizing self-absorption in a scintillation fiber	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 1260 ~ 1260
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/ol.484631	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Hamasaki Takuya, Tsutsumi Yasuhiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Propagation of photoluminescence photons in fluorescent optical fibers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 448 ~ 454
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2022xb10073	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 森本翔貴, 山口憲司, 堤康宏
2. 発表標題 赤方偏移に基づく放射線位置器の同時計測しきい値依存性
3. 学会等名 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 堤 康宏, 岩本一希, 鈴木優志, 瀨崎拓也
2. 発表標題 側面誘起蛍光法に基づいた蛍光ファイバの伝送損失測定に関する検討
3. 学会等名 信学技報, vol. 121, no. 332, OFT2021-66, pp. 57-60, 2022年1月
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 Yasuhiro Tsutsumi, Ichiro Fujieda
2. 発表標題 Design of a highly sensitive position-sensitive detector based on redshifts in photoluminescence spectra
3. 学会等名 Proc. SPIE 11504, Imaging Spectrometry XXIV: Applications, Sensors, and Processing, 1150408 (22 August 2020); https://doi.org/10.1117/12.2567823 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤枝一郎, 堤康宏
2. 発表標題 微弱光用の位置検出器を大面積にする方法
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会(オンライン開催)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------