

DEVELOPMENT AND APPLICATION OF OPTICAL FIBER WITH “SIDELIGHT SASH”

Satoshi Hatori^{#A)}, Hiroshi Sugihara^{B)}, Hiroki Iwasaki^{B)}

A) The Wakasa Wan Energy Research Center

64-52-1 Nagatani, Tsuruga, Fukui, 914-0192

B) Wired Japan Co. Ltd.

2-62-8-507 Higashi-Ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo, 170-0013

Abstract

We designed an optical fiber with “sidelight sash”, on the surface of which the light can be captured. The idea was for the fiber scintillator with a large attenuation length. The profile of the light capture is available for the arbitrary size of the light source. In this paper, the evidence of the light capture by the “sidelight sash” on the optical fiber is shown and examples of the future applications are introduced.

採光機能付与型光ファイバーの開発と応用

1. はじめに

若狭湾エネルギー研究センター加速器施設では加速器やビーム輸送系のビームプロファイルモニターやビームポジションモニターなどのアクティブなビーム診断装置に加え、補助としてビームが搬送ダクトを衝撃したときに発生する放射線を検知し、ビームロス位置を検知するビームロスモニターを用いている。

ビームロスモニターにはプラスチックシンチレーションファイバーを用い、ファイバーの両端に到達するシンチレーション光の時間差からビーム損失位置を同定している。

しかし、プラスチックシンチレーターの減衰長はメートルオーダーであるため、感度の位置依存性が大きく、10 m 程度のものを複数用い、ビーム損失位置の検出のみに用い、ロスの程度に関する定量性は測定していない。

採光機能付与型光ファイバーは減衰長が長いシンチレーションファイバーを実現するためのアイデアとしてスタートした。減衰長の長い導波用光ファイバーの周りにシンチレーション物質をクラッドとして配し、シンチレーション光をコアのライトガイドファイバーに取込むというものである。

ライトガイドは光源に接する端面で採光するのが通常であり、光源のサイズはライトガイド端面の面積に制限される。このファイバーは側面で採光するものであり、さらに採光部の長さに比例して採光される強度が増えると期待される。したがって、上記のファイバーシンチレーターのよう、長尺もののシンチレーター以外にも、複数の採光ファイバーをシンチレーターの中に突き刺したようなもの、平板シンチレーターの中を走査線状に配したものなど、さまざまなジオメトリーが可能であり、光源の空間的な広がりに合わせて採光方式をとることができる。

本稿では、側面からの外光取り入れのアイデア、プラスチック製光ファイバーに採光機能を形成し、

実際にクラッドに波長シフトファイバーを融解したものや液体シンチレーターなどを用いての採光の現状、採光ファイバーのジオメトリー例、加速器におけるビーム診断や、加速器や原子力施設におけるエリアモニターなどの将来の応用例などを紹介する。

2. ファイバー側面からの採光原理

2.1 「みたらし団子」

光ファイバーはコアに屈折率の高い材質を用い、コア端面で取込まれた光はコアより屈折率の低いクラッドとの間で全反射を繰り返し導波される。一方、側面から侵入する光は全反射することはなく減衰してゆく(図 1a の①)。垂直に入射する光にいたっては通過するのみである(図 1a の②)。

一方、図 1b は光ファイバーの一部に膨らみをもたせたものである。団子を串刺しにしたような形状を考えてもらえばよい。この形状から、我々は「みたらし団子」と呼んでいる。図 1a と同じく有限角で側面から侵入する光①は、「みたらし団子」の曲率により反射角を変えられ、続く円筒部では全反射臨界角を越えることが可能になる。

ファイバーに対し垂直に入射する光②も、「みたらし団子」に入射すれば、入射角は有限角となり、「みたらし団子」部での屈折・反射を経て、続く円筒部では全反射が可能となりうる。

また、通常の光ファイバーが端面から集光する場合、開口数

$$N.A. = n_0 \sin \theta_{\max} = \sqrt{n_{CO}^2 - n_{CL}^2}$$

であらわされるようなある程度指向性を持った光源が要求されるが(図 1a)、「みたらし団子」が集光する場合は、むしろ指向性のない、等方的な光源が適していると言える。このことは、後に示す光源、シンチレーターとの接続ジオメトリーの多様性につながる。

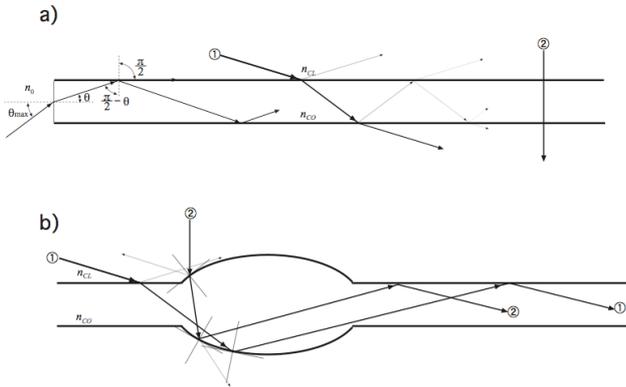


図1 ファイバー側面へ入射する光

a)は通常の光ファイバーである。端面から取り込み、取込んだ光がファイバー内を全反射するという条件から、開口数 N.A.なる指向性のマッチング条件が決まる。側面から入射する光は、部分反射を繰り返した上、減衰する。

b)は「みたらし団子」をもつファイバーである。ファイバーに垂直に入射する光②でさえ「みたらし団子」部では有限角での侵入となり、続く円筒ファイバー部で全反射による搬送を可能とするかもしれない。

2.1 「みたらし団子」の形成

「みたらし団子」テスト初期において、光ファイバーには三菱レイヨン製エスカ CK-40^[1]を用いた。コアはアクリル、クラッドはテフロンである。

ファイバーは、その両端を引っ張るように形成される。半田ごてで加熱することにより、張力エネルギーは容易に開放され、加熱部分は自然と「みたらし団子」状の構造となった。

現在、プラスチックファイバーによるテストと並行し、石英ファイバーを放電溶着加工を施し「みたらし団子」を形成する試みも行っている。石英ステップインデックス 400/440 μm ファイバーにみたらし団子形状を施した(図2)。



図2 石英 440 μm ファイバーに形成した「みたらし団子」

3. 「みたらし団子」での採光

3.1 蛍光灯での採光試験

前節 2.2 にある方法で「みたらし団子」を形成したプラスチック製ファイバー(エスカ CK-40)の終端に光強度計を接続し、他端は遮光した。「みたらし団子」を持たないもの、2つもつもの、5つもつものに 20W U 字型蛍光灯の光を照射した。それぞ

れの場合に採光された光強度を表 1 にまとめた。みたらし団子をファイバーに加えることにより、外光取り入れが可能になることを示している。さらに、みたらし団子の数を増やすと採光量が増える傾向もみることができる。

表 1 : みたらし団子による蛍光灯の採光試験

	実施例 1	実施例 2	比較例 1
形状	リーキー用遮光部 先端部遮光	リーキー用遮光部 先端部遮光	リーキー用遮光部 先端部遮光
外光取込測定値	5.69 μW	3.20 μW	286 nW
形状比較値	$\times 19.9$	$\times 11$	$\times 1$

3.2 放射線計測テスト用「みたらし団子」

若狭湾エネルギー研究センターのシンクロトロン(周長 33.4 m)の真空ダクトにはビームロスモニターが設置されている。シンクロトロンを4つのセクションに分け、ダクトの内周側、外周側に4本ずつ、10 m のプラスチックファイバーシンチレーター BCF-20MC が張られている。シンチレーターの両端は FC コネクターが取り付けられ、同じく FC コネクターで処理された 20 m の石英ファイバーにより信号処理ステーションの光電子増倍管に接続される。ビームロスの位置同定はシンチレーター両端からの信号の遅延同時計測および時間差測定により行っている。

「みたらし団子」のテストはこのビームロスモニターの計測系を利用して行った。すなわち、ファイバーシンチレーターのかわりに「みたらし団子」をもつプラスチックファイバーを接続した。図 3 に「みたらし団子」テスト用ファイバーを示す。

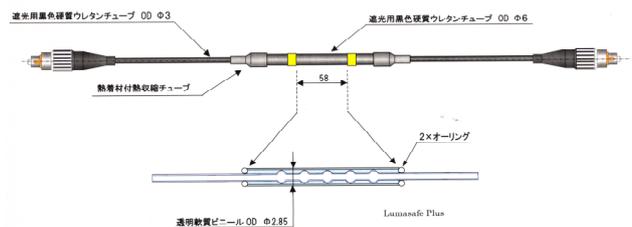


図3 「みたらし団子」テスト用ファイバー

「みたらし団子」部は透明軟質ビニールで覆われ、ファイバーとビニールの間には液体シンチレーター Lumasafe Plus を満たしてある。図 3 では有感領域が 58 mm のものを示しているが、140 mm のものも作成した。両端は FC コネクターで処理され、ビームロスモニターのファイバーシンチレーターと交換することができる。

3.3 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線源によるテスト

既存ビームロスモニターに沿わせるように「みたらし団子」ファイバーをセットし、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線源を用いて、信号の読み出しを試みた。図 4 は両端から

信号を読み出し、ひとつはファイバー全長の伝搬時間の2倍遅延させ、他端からの信号との時間差を測定したものである。a)はロスモニターを使ったもの。b)はロスモニターの代わりに前節の「みたらし団子」テスト用ファイバー(図3)を用いた。

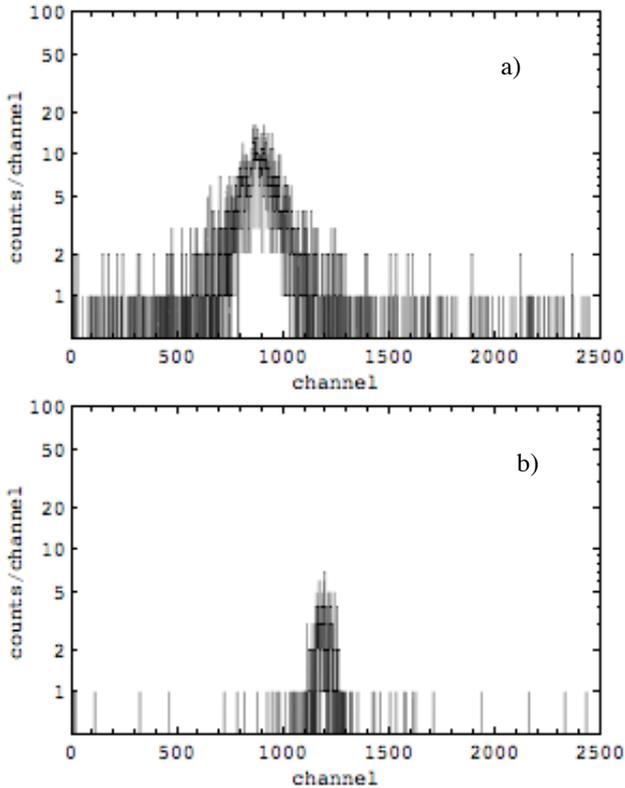


図4 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ β 線源を用いた測定

a)はロスモニターの両端信号の遅延同時計数によりえられる時間差信号。2500 chが10 mに相当。b)はロスモニターの代わりに「みたらし団子」を用いた。

線源はロスモニター、「みたらし団子」双方を照射できるように、コリメーターも用いなかった。ロスモニターが有感領域が10 mあるのに対し、「みたらし団子」は58 mmであるので、 β 線の広がりをおさえていないかもしれない。a)とb)で計数比は計数比は $b/a = (13.5 \pm 0.1)\%$ であるが、中心チャンネルでのピーク計数は30%程度までは達している。

両端から読み出した波高値がロスモニターに比べ非常に低く、液体シンチレーターの体積を増し発光量を上げ、さらに、集光効率についても定量的な調査、改良をしていかなければならない。

3.4 ビームロスを用いたテスト

シンクロトロンに9 MeV陽子をタンデム加速器より入射し、シンクロトロンにより200 MeVまで加速し、その間、ビームロスにより発生する放射線をロスモニター及び「みたらし団子」テスト用ファイバーで計測した。テスト用ファイバーには有感領域

140 mmのものを使用した。

図5はビームロスのみたらし団子で計数した時間差スペクトルである。カウンティングレートが高くCAMACを用いたデータ収集系のライブタイムレートは $(9.0 \pm 0.1)\%$ にとどまる程度であった。したがって、偶然同時計数の割合が高い。Trueをチャンネル領域[1067, 1382]にあるピークとし、オフピークの計数から偶然同時計数を推定すると、S/N比は 1.8 ± 0.1 程度である。

データ収集系はイベント発生のタイミングをシンクロトロンへの入射基準信号からの経過時間として記録している。図6は図5におけるピーク領域が計測された時間を示している。タンデムビームの捕獲は30 msまで続くが低エネルギーイベントには感度がまだ低い。200 ms後あたりから、感度が現れるが、ビームエネルギー35 MeVに相当する。加速終了は600 msで、400 msかけて取り出すが、相当するイベントを見てとれる。

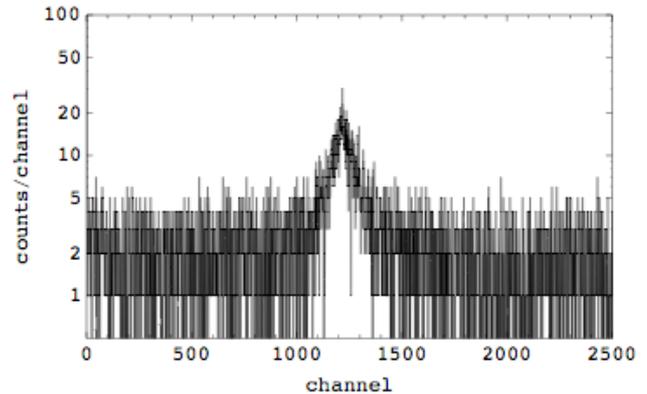


図5 みたらし団子によるビームロス検出時の両端読み出し時間差スペクトル

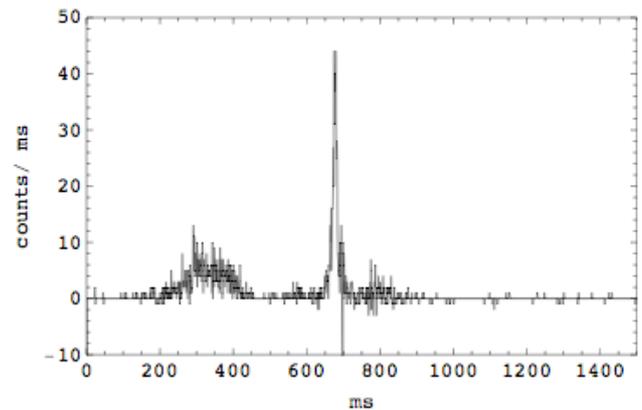


図6 みたらし団子検出イベントの入射基準からの経過時間

4. まとめと今後の応用

光ファイバーに「みたらし団子」状の形状を設けることにより、側面からの採光性能を付与することができる。テストでは「みたらし団子」状形状をも

つ光ファイバーに FC コネクターを介し 20 m の石英ファイバーを接続し、終端の光電子増倍管まで搬送が可能であったから、ファイバー内を全反射する光の取込みに成功していると思われる。

光ファイバー側面からの採光が可能になることにより、長尺の位置検出器が可能になる。光ファイバーの伝送距離は km オーダーであるから、小型加速器を利用する施設における、ビームロスモニターやエリアモニターなどが、一筆書きで設置できる可能性がある。

また、側面からの採光には、光源が等方的、指向性をもたないようなものが適しているといえる。このため、シンチレーターに埋め込んで用いるのが基本となる。たとえば、図 7 のようなシンチレーター構造体にスリットを施したものに、集光ファイバーを埋め込み、放射線イメージンスファイヤーやプロファイルモニターのような使い方や、また、図 8 のような集光ファイバーを埋め込んだシンチレーターを加速器や放射線施設のエリアモニターとして随所に設置し、光ファイバー束にまとめ、その先端を CCD に接続するような方法も考えられる。安全面で確実性の求められるエリアモニターなどは、先の一筆書きシリーズ方式ではなくパラレル接続の方がよいかもかもしれない。

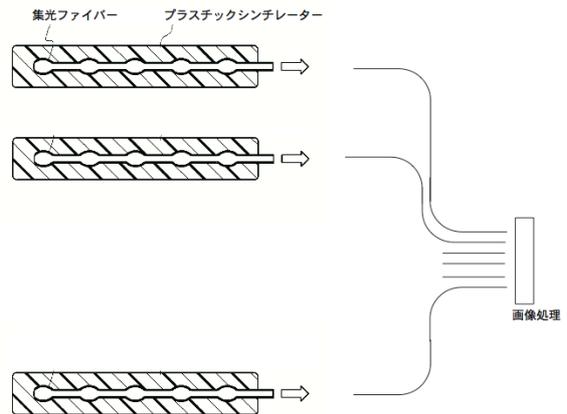


図 8 並列接続エリアモニター

また、採光のエビデンスをえたのみで、採光効率や隣り合う採光部間での搬送効率のチェックなど定量的な検証も残っている。また、長尺化がどのような方法で可能となるかという問題も残っており今後の解決課題である。

参考文献

- [1] <http://www.pofeska.com/pof/eskaf/eskaf.htm>

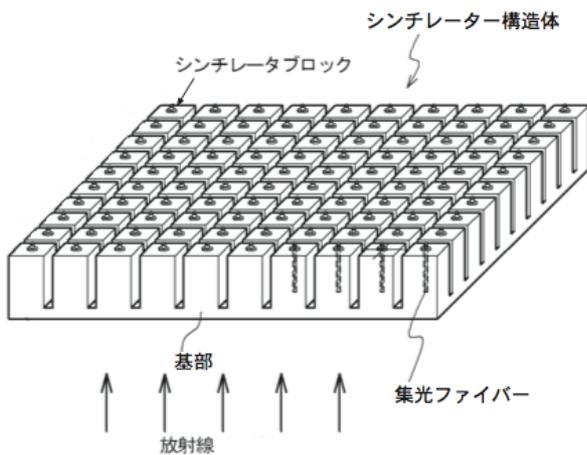


図 7 イメージンスファイヤーの例