

円形光ファイバーの形状変化による光量差のパターン検知

コース	基盤科学コース
学籍番号	070050
氏名	石井光
指導教員	ルジェロ・ミケレット

Generally, light fiber is used as a communication tool. But in this research, we found a new light fiber's application. We call this 'circle fiber sensor'. This sensor detects in high sensitivity the mechanical shift of the fiber. We research that sensor's mechanism, and try to make a real instrument.

1. 研究背景、および目的

光ファイバーとは離れた場所に光を伝える伝送路である。低損失でありかつ光を媒体するために広帯域で、電磁放射もしないために電磁耐性も高いものを持っているために光ファイバーは通信媒体としての主力として利用されている。この光ファイバーの持つポテンシャルと全反射の原理を有効活用したのが、今回我々が研究した円形ファイバーセンサーである。通常ファイバーなら前述したように損失が少なく光は伝送される。しかし、円形に曲げることによって光は臨界角を超え(図1)、入る光量と出てくる光量の差が発生する。この光量の差が円形の部分でのみ発生することを利用してセンサーとして応用することを目指し、それを目的として研究を行った。特に現在振動センサーや微小変化を検知する装置は非常に高価であるがこの研究はそういった問題を解決する可能性を持っている。円形光ファイバーセンサーは単純でかつ安価であり次世代のセンサーの主力としての可能性を秘めていることをこの研究を通して説明する。

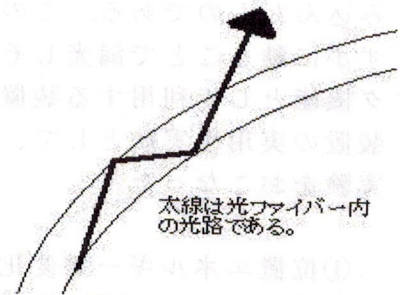


図1: 臨界角を超えた光路

2. 基本原理

前節で述べたとおり臨界角を超えることによる漏光について考える。漏光させるために円形にファイバーを形成し、漏光するような条件を求めべく(図2)のような図形モデルをつくり、反射角 α が臨界角となるような円形ファイバーの半径 R を求めた。

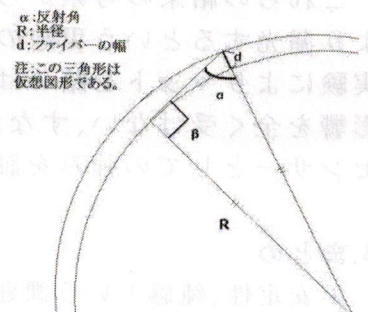


図2: 円形ファイバーセンサーの図形モデル

スネルの法則 $\sin \alpha = \frac{n_a}{n_b}$

と正弦定理による式 $\frac{R}{\sin \alpha} = \frac{(R+d)}{\sin \beta}$

そして屈折率、ファイバーの幅の値を与えることで $R=0.9[\text{cm}]$ と定めることができる。これは円形ファイバーをわずかに動かすことでどれだけ光が漏れるか、すなわち漏光量変化実験でも同じような結果が出ている。

3.実験装置による検証

研究目的で述べた円形光ファイバーセンサーの利用可能性を示すために、我々はファイバーマットという装置を作った[図 3]。この装置は $R=0.9[\text{cm}]$ とする円形ファイバーをマットに組み込んだものである。この円形ファイバーがわずかに動くことで漏光しその漏光量をセンシング機能として利用する装置となっている。この装置の実用性実験として、我々は以下の3種の実験をおこなった。

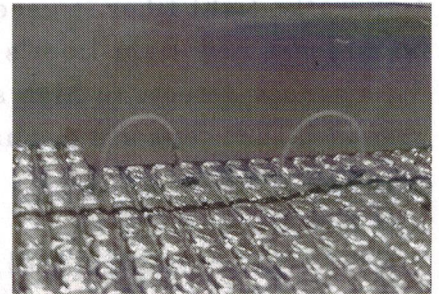


図 3:ファイバーマット

- ①位置エネルギー量変化による漏光量変化
- ②観測点からの位置量変化による漏光量変化
- ③振動装置から発する振動数変化による漏光量変化

4.結果

位置エネルギー量は増していくと漏光量も増えた。位置エネルギーが低いうちは比例の関係に近かったが、段々と位置エネルギーを大きくしていくと漏光量の変化量が減っていった。位置量は観測点から値を大きくしていくと、漏光量は不規則に変化した。振動数はまったく漏光量の変化量を見られなかった。つまり振動数と漏光量の変化の関連性は見出すことができなかった。

これらの結果の考察からマットの変形により円形ファイバーが変形し、それにより漏光するという現象の結果であるという結論に至った。ファイバーマットの実験によりマットを踏めばどの点からでも観測でき、かつ振動数といった外部の影響を全く受けない、すなわち汎用性の高さや長距離使用を可能にするといったセンサーとしての強みを証明することに成功した。

5.まとめ

不安定性、鈍感という課題が残るものの円形ファイバーセンサーには安価であり、汎用性が高く、長距離使用が可能であるといった利点が本研究により判明された。かつこの研究でそういったセンサーとしての強みと、実用化の可能性を持っているセンサーであることを示すことができた。

円形光ファイバーの形状変化による光量差のパ
ターン検知

横浜市立大学
国際総合科学部 国際総合科学科
基盤科学コース ミケレット研究室
学籍番号 070050

石井 光

目次

第一章 序論	1
1.0 要約	1
1.1 はじめに	1
1.2 基本原理	2
第二章 円形ファイバーを使った装置による検証	5
2.1 センサーマットの作成	5
2.1.1 センサーマットの特徴と検証	6
2.1.2 エネルギー量変化によるマットの検知の差異	9
2.1.3 ファイバーからの距離との関係	10
2.2 直接接触による不安定性	12
2.3 振動数による検知の不変化	14

第三章 応用案と課題点 15

3.1 応用案 15

3.2 課題点 18

第四章 総合考察 19

4.1 まとめ 19

4.2 展望 19

第一章 序論

1.0 要約

光ファイバーは主に通信手段として現在多方において利用されている。そして近年、光ファイバーを光電センサーとして利用する方法も広まってきている。我々はさらにその光電センサーとは別のセンサー利用法を発見した。それが円形ファイバーセンサーである。このセンサーは光ファイバーを円形にし、それにより発生する臨界角(critical angle)から発生する光量変化を使った装置である。

本研究ではこの原理を数学的かつ物理的に解明し、円形ファイバーセンサーを使った装置を作り様々なデータをとった。その結果と光ファイバーという製品の強みである安価、柔軟、多汎用性といった利点を使い防犯センサーや安全装置といったものに利用することができることを証明する。

1.1 はじめに

光ファイバーとは離れた場所に光を伝える伝送路である。透明度の高い材料を用い、coreと呼ばれる中央部の屈折率の高い部分と、cladと呼ばれる周辺部の屈折率の低い部分から構成されている。光はコアとクラッドの境界で全反射しながら進むので、光ファイバー内部に閉じ込められて低損失(漏光も0.2~0.3[%]ほどであり電磁気の影響も受けない)に伝送することができる。

この様な原理を持っているために光ファイバーはデジタル通信を中心として様々な通信用途に使われている。が、近年光ファイバーセンシングという光ファイバーをセンサーとして利用するものを研究している。前述したように光ファイバーは伝送路として非常に優れた特質を有しており加えて光計測技術が物理原理に基づく計測であるため電磁ノイズや科学汚染に対する干渉性、非侵襲性を確保できることから[1]光電センサーの一つとして光ファイバーセンサーが活用されている。

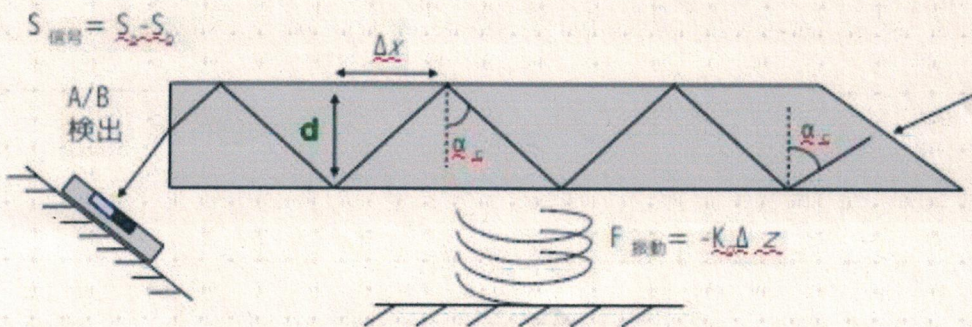


図1: 光ファイバーセンサーのしくみ。振動によって光路が変わる。その変化を検出して利用する光電センサーが光ファイバーセンサーである。

内部光の振動数や光路変化などを利用しているのが現段階に置ける光ファイバーセンサーの主な利用方法である(図1)が、筆者は漏光を使った光ファイバーのセンシング機能を研究している。これはまだ誰もやっていない新しい研究であり光ファイバーの利用の新しい可能性である(図2)。

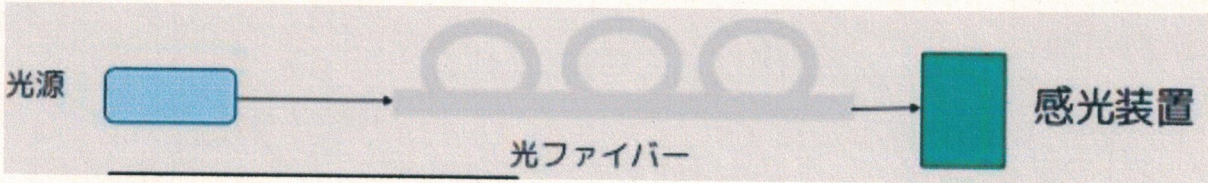


図2：円形ファイバーセンサーの簡易仕組み図

普通の光ファイバーセンサーと同じように光源から光ファイバーを通し感光装置により光の変化を感知する。ただし後述するが円形ファイバーの光の変化は光の強度の変化である。

本稿では、この基本原理と判明した有用性について報告する。

1.2 基本原理

光ファイバーは1.1で述べたとおり光を低損失で伝送できるツールである。

しかしスネルの法則(Snell's law)(式1)があるために光ファイバーでも漏光するケースがある。

$$\sin\theta_m = \frac{n_a}{n_b} \quad \dots\dots (式1)$$

光ファイバーの円形センサーはこのスネルの法則を利用したセンサーである。臨界角を越えると光が漏れるので光量はそれだけ低下する。この影響をセンサーとして利用するのが本論文での主旨となる円形ファイバーだ。

円形ファイバーの仕組みはその名の通り光ファイバーを円形に変形したものである(図1)。円形ファイバーをわずかに歪めることでファイバー内部の光は臨界角を越え光は漏れる。これによりセンサーとしての機能を果たす、という仕組みだ。これを満たすような半径があることを下の行から始まる文でもって説明する。

臨界角(critical angle) θ_m は光ファイバー内の光の中を通る内部(core)の絶対屈折率 n_b と光ファイバー内の光を反射する外部(clad)の絶対屈折率 n_a によって必ず定義されている。

今回利用した光ファイバーは株式会社フジクラ製の「SM・10/125・05」である。この光ファイバーの n_a は1.46で n_b は1.48である。

これにより臨界角は 80.6度と求められる。この値を利用して円形ファイバーの適正半径を決める。

(図3)をみれば分かる通り、正弦定理(law of sines)から(式2)を作ることができる。

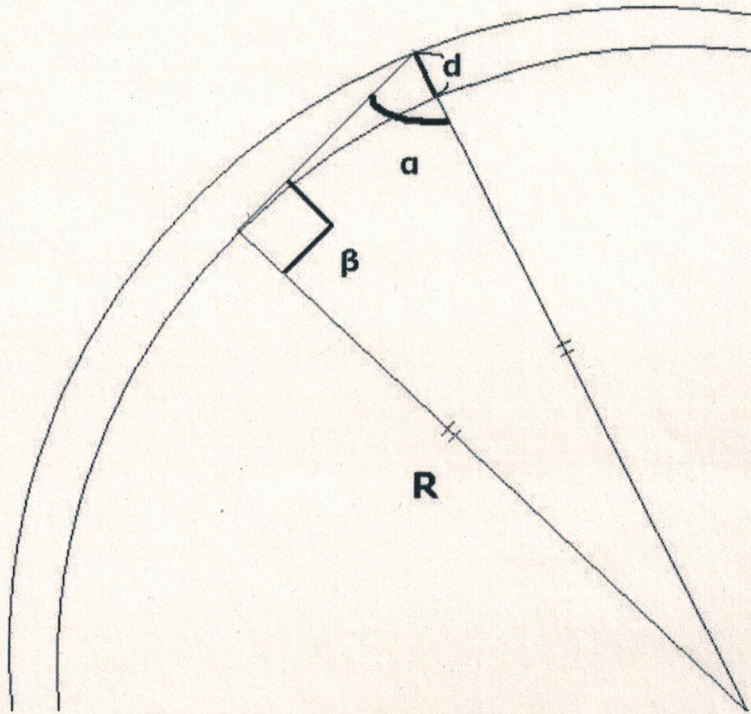


図3 円形ファイバーの図

光路は円の接線となるように通る。そのために β は直角をとる。
 α が臨海角をとるような R を求めることが出来る。

$$\frac{R}{\sin\alpha} = \frac{(R+d)}{\sin\beta} \quad \dots\dots (式2)$$

(式1)と(式2)から、理想的な半径 R を求める。

まず、(式2)を変形する。

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{R}{R+d} \times \beta \quad \dots\dots (式2')$$

α が臨界角のとき、(式2')は(式1)に当てはめることができる。

つまり、

$$\frac{n_a}{n_b} = \frac{R}{R+d} \sin\beta \quad \dots\dots (式3)$$

と置ける。これを R について式を整理する。 $\frac{n_a}{n_b} = k$ とすると、

$$R = \frac{k}{\sin\beta - k} d \quad \dots\dots (式3')$$

と表すことができる。

ここで、「SM・10/125・05」のクラッド間の幅((式3')の場合は d)は $125 \times 10^{-6} [m]$ である。

β は円に接して直進する光の特性から 90° である。そして前述した core と clad の絶対屈折率、以上三つを(式3)に代入すると、

$$R = 9.13 \times 10^{-3} [m] \quad \dots\dots (値1)$$

と R を一定の値として算出することができる。つまり真円という理想状態の場合において漏光するとき、言い換えれば臨界角を越えるときの半径を定めることができる。これが円形センサーの原理の肝の一つである。

数学的には臨界角を越えるときの円形ファイバーの半径 R を求めることができた。そこでこの値の確証を得るために、実際にどの半径を取るときが漏光量が大きく取れるか実験を試みた。

やり方は(図4)に描かれている装置を使う。

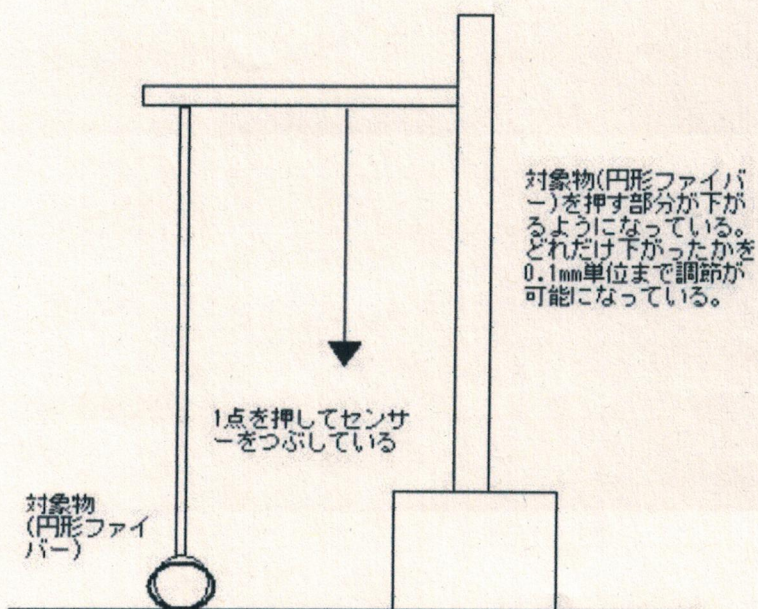


図4:対象物を一定量だけ押す装置

この装置で押す量を0.5[mm]と定める。そして円形ファイバーの直径を2.2[cm]、2.1[cm]、2.0[cm]、1.9[cm]、1.8[cm]、1.7[cm]、1.6[cm]、1.5[cm]の場合を測定した。結果は(図5)のようになった。

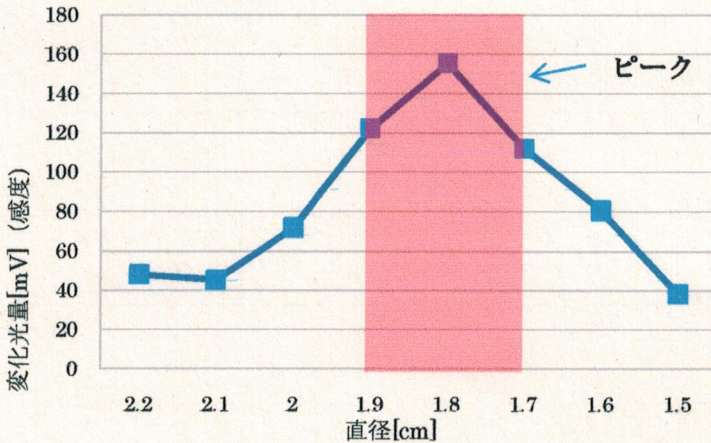


図5: 光量変化とセンサーの径の大きさの関係グラフ

x 軸: 円形ファイバーの直径[cm]

y 軸: ファイバー内を通る光の変化光量[mV]

これを見て分かる通り、最も漏光さが激しくなるのは1.9~1.7[cm]、つまり半径約9[mm]の長さを持つ円形ファイバーであるという結論に至った。

この実験によりわずか0.5[mm]の変化量でも漏光が検出される特性が、センサーとしての有用性を示している。つまり微量な変化でも検出することができるセンサーとしての有能性を示していることがわかった。

第二章 円形ファイバーを使った装置による検証

2.1 センサーマットの作成

以上で述べたような原理を使う円形センサーであるが、この項では我々が作った、円形センサーの原理を利用した円形センサーの利用法を紹介する。また、円形ファイバーの興味深い特徴を発見したため、その特徴もこの項で説明する。

2.の項で、内部光の臨界角をとるような円の形成が出来ることを示した。そこでそ

の臨界角をとるような円を使った装置をつくった(図6)。

距離との関係性はファイバーの真ん中に線を引いたところで測定する

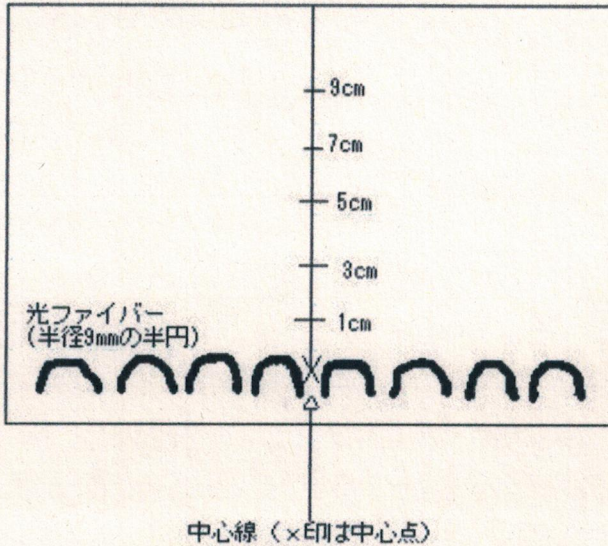


図6：上から見たファイバーマットの簡易図

真ん中に割ってある線は中心線である。中心線上とファイバーの直線上とが重なる点を中心点とする。

この装置はファイバー付近での振動を感知すると円の形が変形し、臨界角をわずかに越え漏光の現象がおこる。それによってセンサーマットは振動感知のセンサーとしての機能を果たす。その機能性を検証するために、我々はこのセンサーを使って様々なデータをとって見た。

2.1.1 センサーマットの特徴と検証

まず、関係図を考慮せずにデータをとって見た(図7)。

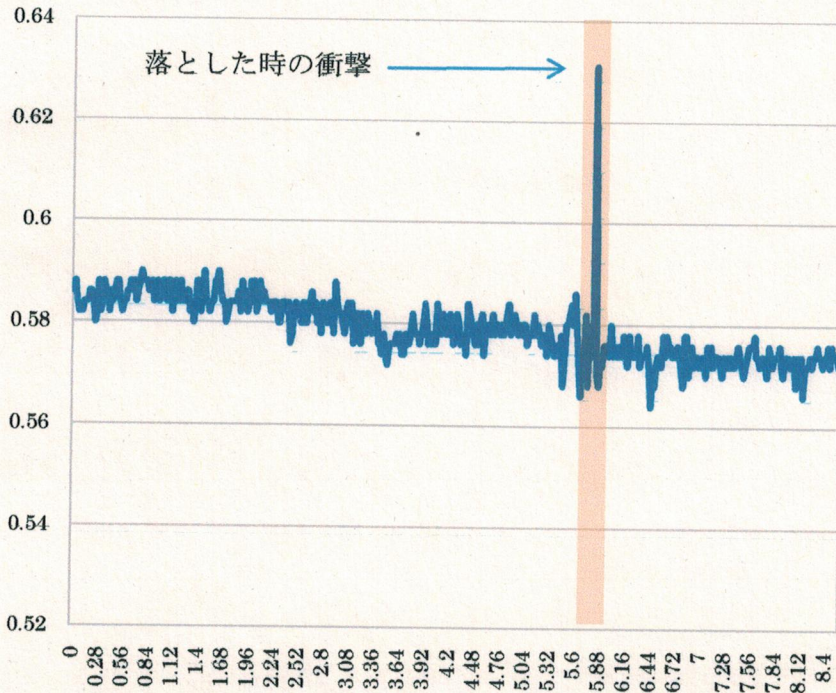


図7-1:20gの重りを落としてみる

x座標：秒[s]

y座標：ファイバー内の光量[mV]

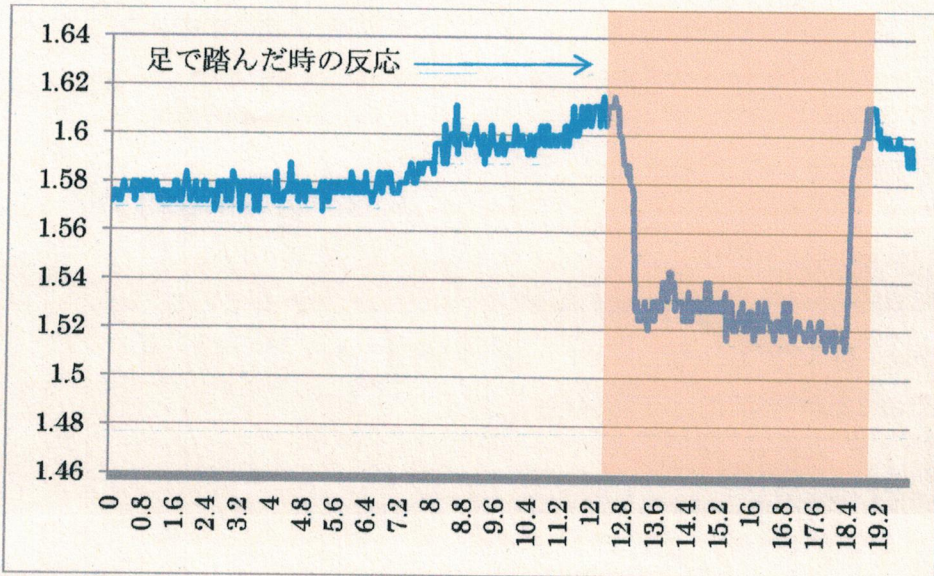


図7-2:学生(72kg)の片足でマットを押してみる

x座標、y座標は同上

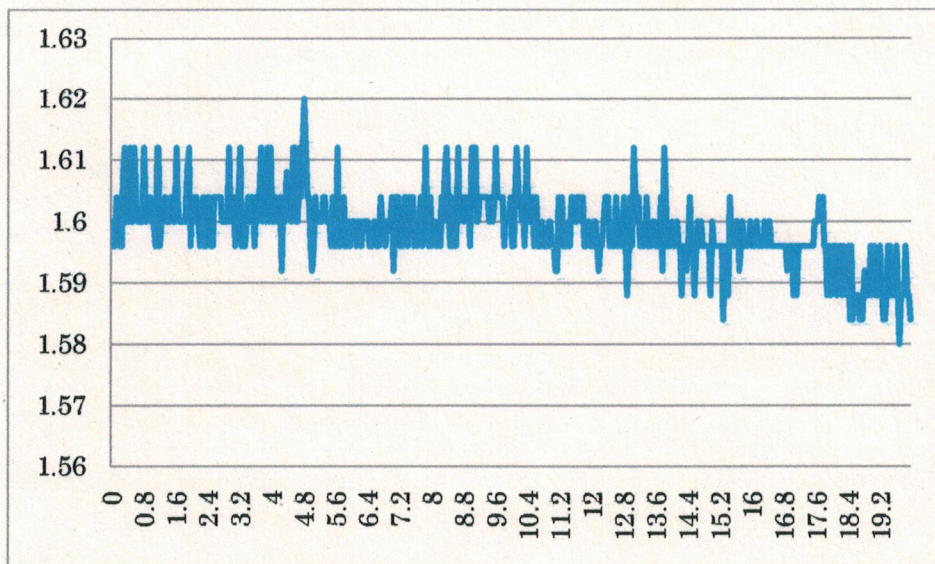


図7-3:振動数を指定して振動装置をマットに当ててみる

x座標、y座標は同上

これら三つのデータから、面白い特徴が見つかる。それは振動ではなくマットの負荷によってこのファイバーセンサーは反応を示すことである。つまり振動検知でなくマットを押すことによる変形の度合いに依存していることが分かる(図8)。この要因はセンサーとしての利用方法にある。

— 変形前
— 変形後

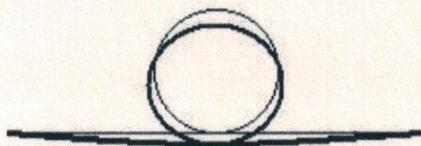


図8:マットの変形によるファイバーの変形

光ファイバーをセンサーとして利用する主な使用法は、第一章で述べたとおり光電センサーである。光電センサーは光の経路のズレを感知することでセンサーとしての機能を果たす。

一方の円形ファイバーだがそもそも原理がまったく違う。円形ファイバーは第2章で説明した通り光の強度の変化をセンサーとして活用している。一方光電センサーは光の振動数変化を見る。要するに、光電センサーは周波数(frequency)を感知するが、円形センサーは物理的強度(intensity)を感知する。

この違いは円形センサーと光電センサーの特徴性、だけでなく円形センサーは物理的強度のみを感知することが分かる。しかも物理的強度を感知するのは1.2で述べた原理により円形部分だけである。従ってセンサーとして長距離使用や汎用性の高

い使用ができる。例えば1km以上光ファイバーを伸ばしても、円形にした部分だけセンサーとして活用することができ、他の部分には感受性はない。とても柔軟な使用ができることが分かる。

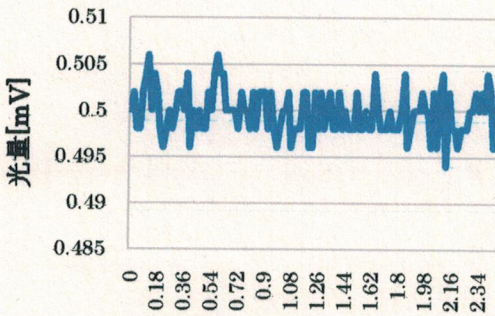
次に様々な相関図を考え、検証してまとめてみた。具体的に言うとエネルギー、形、周波数の三つの相関図をとってみた。

2.1.2 エネルギー量変化によるマットの検知の差異

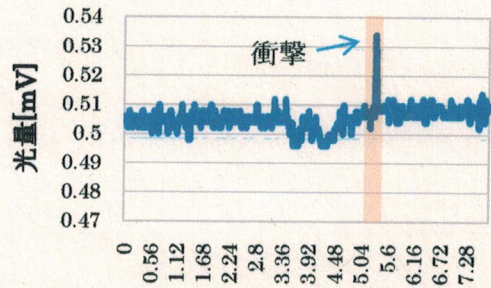
最初は位置エネルギーとの相関である。位置エネルギーを計るために、重さ20gの重りを5通りの高さに変えて検証した。

高さは5cm、10cm、15cm、20cmの5通りで検証した(図9)。

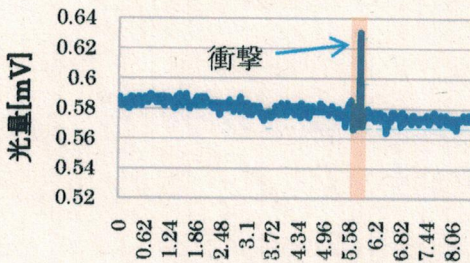
5cmから落とした



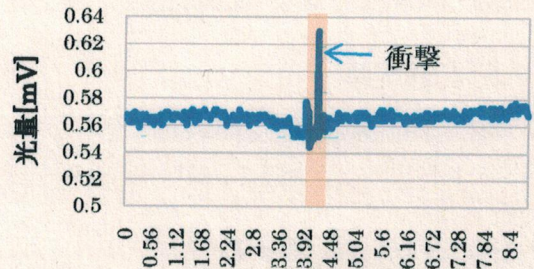
10cmから落とした



15cmから落とした



20cmから落とした



25cmから落とした

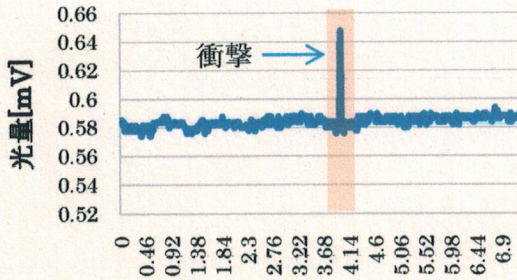
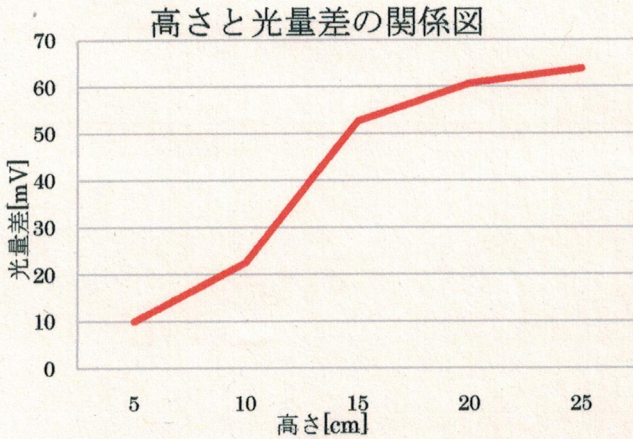


図9：それぞれの高さにおける測定グラフ。x軸は秒[s]。

図に置けるピークの急な下降がおもりとマットの接触したときである。このピーク時と、それ以外の値の平均値の差を算出した(図10)。



高さ(cm)	光量差(mV)
5	10
10	22.5
15	52.7
20	60.7
25	63.9

図10 高さ(と)光量差の関係図

x軸：おもりからマットまでの高さ[cm]

y軸：最小光量値と平均光量値の差[mV]

この結果から考えられることは二つある。一つはエネルギー値が高くなるにつれ値が大きくなっていること。そしてもう一つはある程度エネルギー量に達すると光量差の伸びが低くなることである。

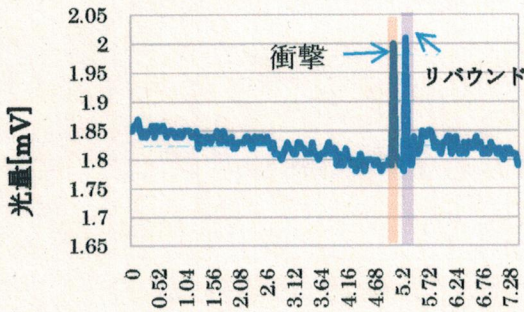
この原因は、上で述べたようにマットの振動を拾っている、という考え方がポイントとなっている。円形ファイバーは空気の振動などを拾っているのではない。つまり純粋にエネルギー量を直接とっていないためにこの様なグラフの結果になるのだ。

2.1.3 ファイバーからの距離との関係

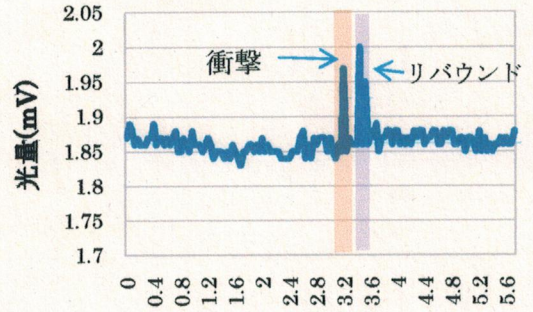
次に距離について考えてみる。わかりやすいように中心線を決めてその線上から

距離を5通り・・・1cm、3cm、5cm、7cm、9cm に分けて調べてみた。落とす物体は20gのおもりで、高さは20cm に固定した。そしてそれぞれのデータを出した(図11)。

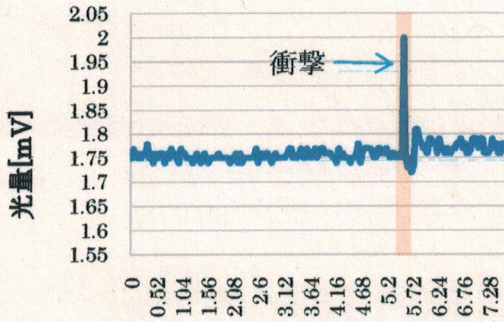
1cm地点から落下



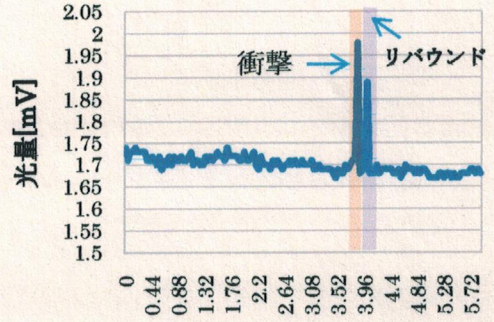
3cm地点から落下



5cm地点から落下



7cm地点から落下



9cm地点で落下

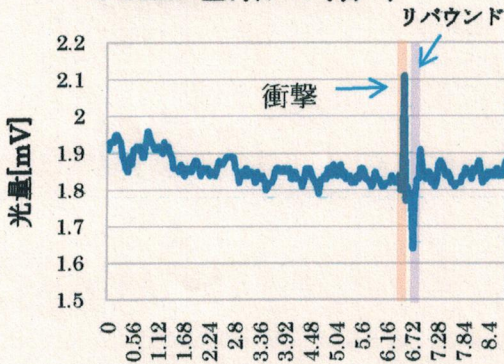
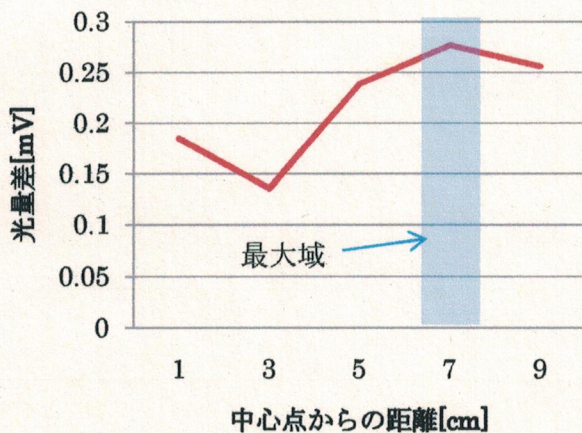


図11：各地点で測定した光量変化グラフ。x軸は時間[s]である。

そして、エネルギー測定と同じく最大値と平均値の差をそれぞれとって見た(図11)。

距離と光量差の関係



長さ[cm]	光量差[mV]
1	0.185
3	0.136
5	0.239
7	0.277
9	0.256

図11:中心点からの距離と光量差の関係のグラフ

このグラフから、光ファイバーに近ければ反応が良いというよりもマツトの変化に敏感となるような位置が、一番感度が良くなることが分かる。

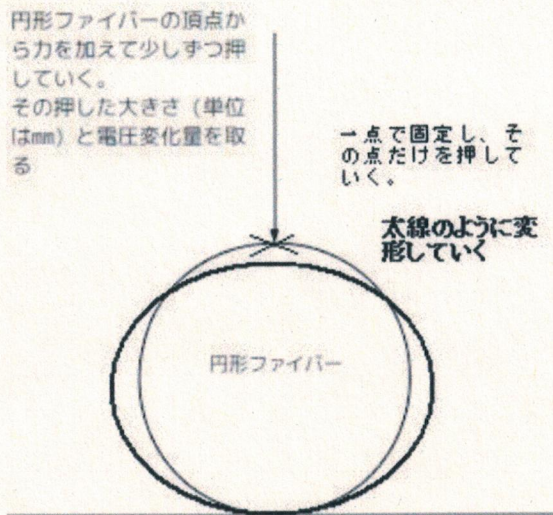
つまり位置もそうだが光ファイバーの位置の付け方にも感度は依存される。今回は実験用に直線に円形ファイバーを並べてみたが、より感度が良くなる並べ方があると考えられる。

2.2 直接接触による不安定性

この円形ファイバーセンサーはとても不可解で興味深い特性がある。それは直接円形ファイバーを押すことによる急激な光量差の発生と不安定性である。微量な円の変形でなく急激な変形を起こすと光量差が急激に変化して面白い挙動をとる。

その挙動を検証するために我々は二つの実験を実施した。

一つは一点集中による変形である。これは円形ファイバーの真ん中の点に負荷をかけてその点が円の底にくっつくまで押すと同時にその変化量と光量差の変化量を検証した(図12)。



点でつぶす

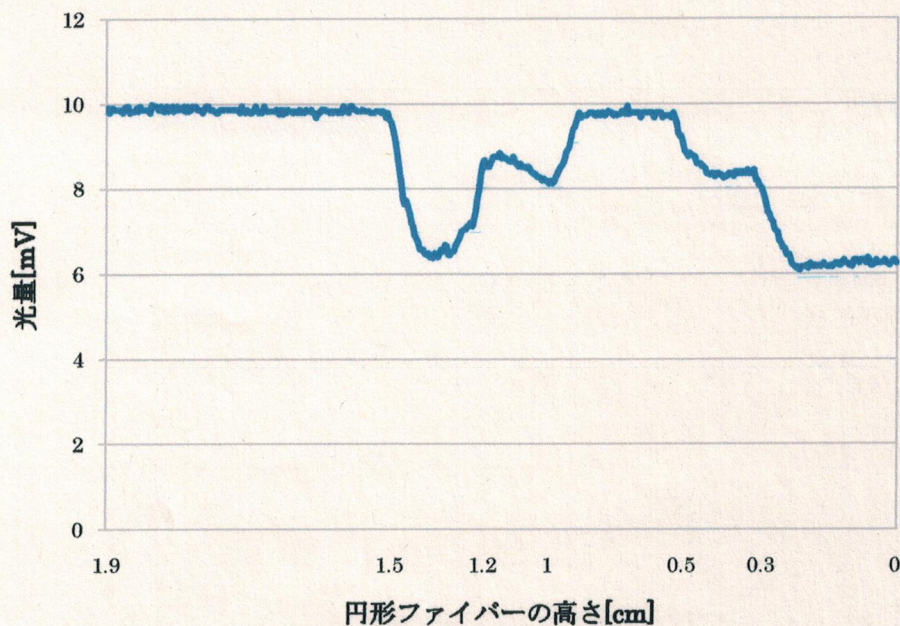
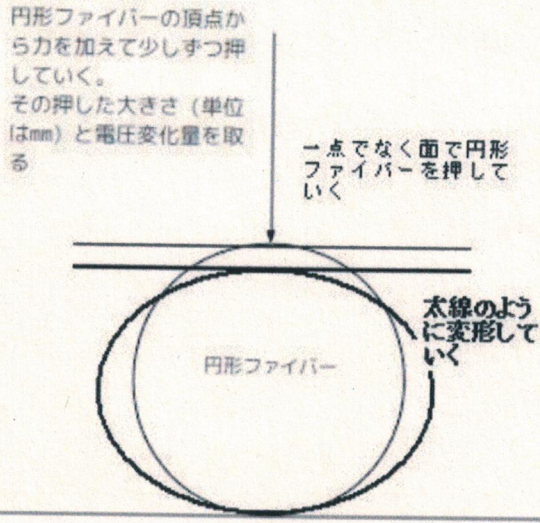


図12:円形ファイバーを点でつぶした際の簡易図とグラフ

次に円全体を押す場合である。この場合は点でなく線で押す。

そうすることでの光量の変化量を円の底につくまでの範囲で検証した(図13)。



面をつぶす

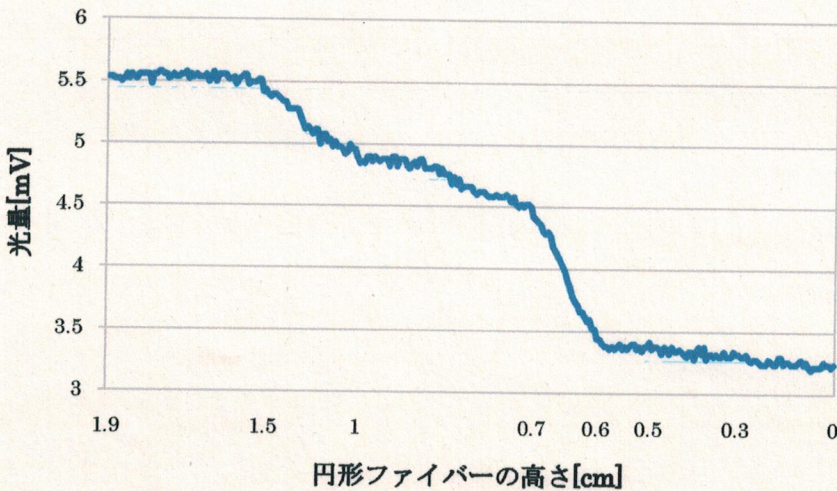


図13：円形ファイバーを面をつぶした際の簡易図とグラフ

二つのデータを見て共通して際立った特徴は同じようになっている。ただし漏光量の変化のしかたは明らかに変わっていることがわかる。

2.3 振動による検知の不変化

最後に振動数を加えることでどのような変化が見られるかを検証した。方法は、中心線から1cm離れたところに振動装置を置く。その振動装置に2Hz、4Hz、6Hz、8Hz、10Hzの5種類の振動数をかけてみた。

結果として次のようなデータを得ることができた(図14)。

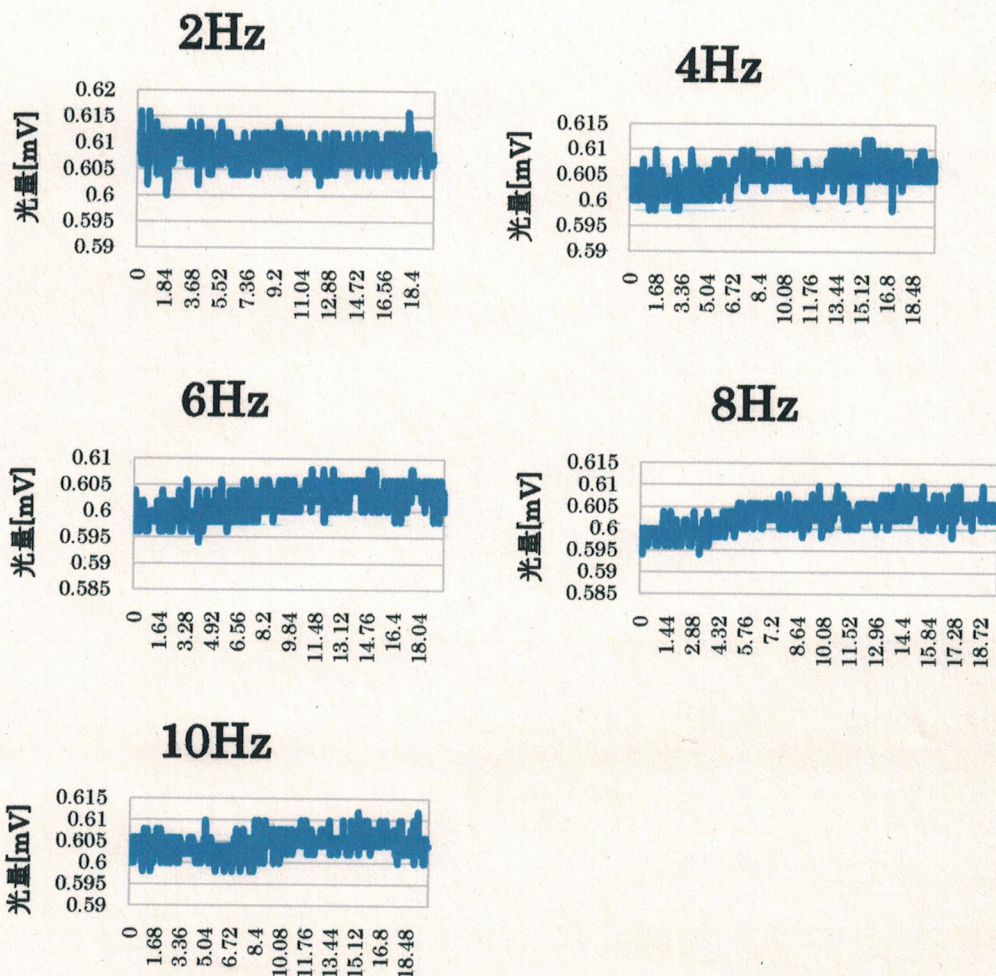


図14 各振動数の検知グラフ。x軸は時間[s]

つまり円形ファイバーセンサーの感知にはまったく振動数に依存されないことが分かる。マットの変化量は振動によるものでは微量すぎるあまり大した変化にはならない。そのために円形ファイバーセンサーでは感知できるようなレベルではない、という考えがこの研究における我々の考察である。

第三章 応用案と課題点

3.1 応用案

円形ファイバーセンサーを研究及び言及していくうちにこの装置の可能性と同時に不安点も有していることが分かった。そこでこの項では光ファイバーの原理や使

い方、特徴を探求し出てきた応用案と課題点を列挙してみる。

まず応用案について考えたい。どう応用するかを考えるに当たって、先ず我々は光ファイバーのセンサー素材としての強みを定義することにした。

素材としての強みは、非常に安価であること・柔軟性に富んでいること・用途の汎用性に優れていることの三つである。

まず一つめ、非常に安価であるという利点であるが、光ファイバーは1kmの長さを数万円単位で購入することができる[2]。

次に柔軟性に富んでいることである。これは円形ファイバーを見てわかるように光ファイバーの材質が非常に柔らかい。

最後に用途の汎用性に優れていること。これは2-1で述べたことであるが円形部分だけが感知することができるため、感知させたい部分とそうでない部分の住み分けが非常に簡単である。

そして、円形ファイバーセンサーは光量の差を見る。そのために変化量は光が漏れた瞬間、一瞬で察知できる。これによりどんな長さで使っても問題がない。

また、これは安価と柔軟性から出てくる利点でもある。つまり設置や使い方に際し、様々な可能性を持つことができるのだ。

これら素材の強みとこれまで論じてきた円形ファイバーの原理、実験を生かしたアイデアを我々は二つ考案した。

まず一つはプラットホームの安全センサーである(図15)。白線にファイバーセンサーをセットする。そして白線付近と内側の床を柔軟にする。こうすることで人が白線の内側に踏み込んだ人を床の変化を感知して円形ファイバーセンサーが反応し、危険を察知することができる。長距離に伸ばしても安価で済むことと、踏むということだけに反応するという利点がある。

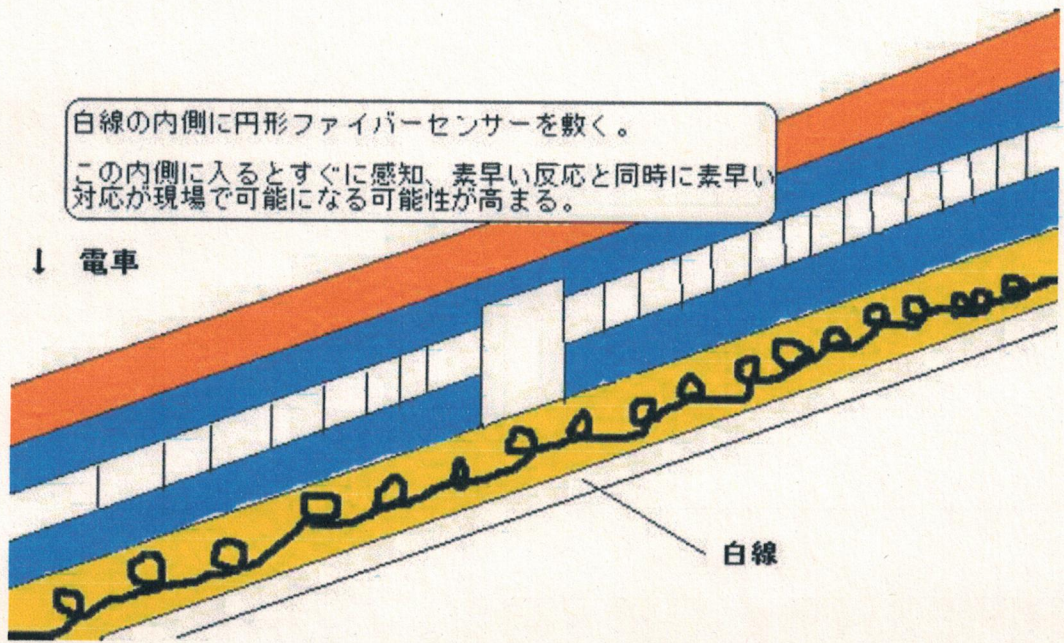


図15：駅のプラットフォームに安全装置としてセンサー利用

もう一つは家に張る防犯センサーである(図16)。家の周りに張り巡らせて感知するというシステムだ。これもプラットフォームの安全センサーと原理は同じである。このようなセンサーはいくらでもあるが安価で設置できるのが最大の利点である。

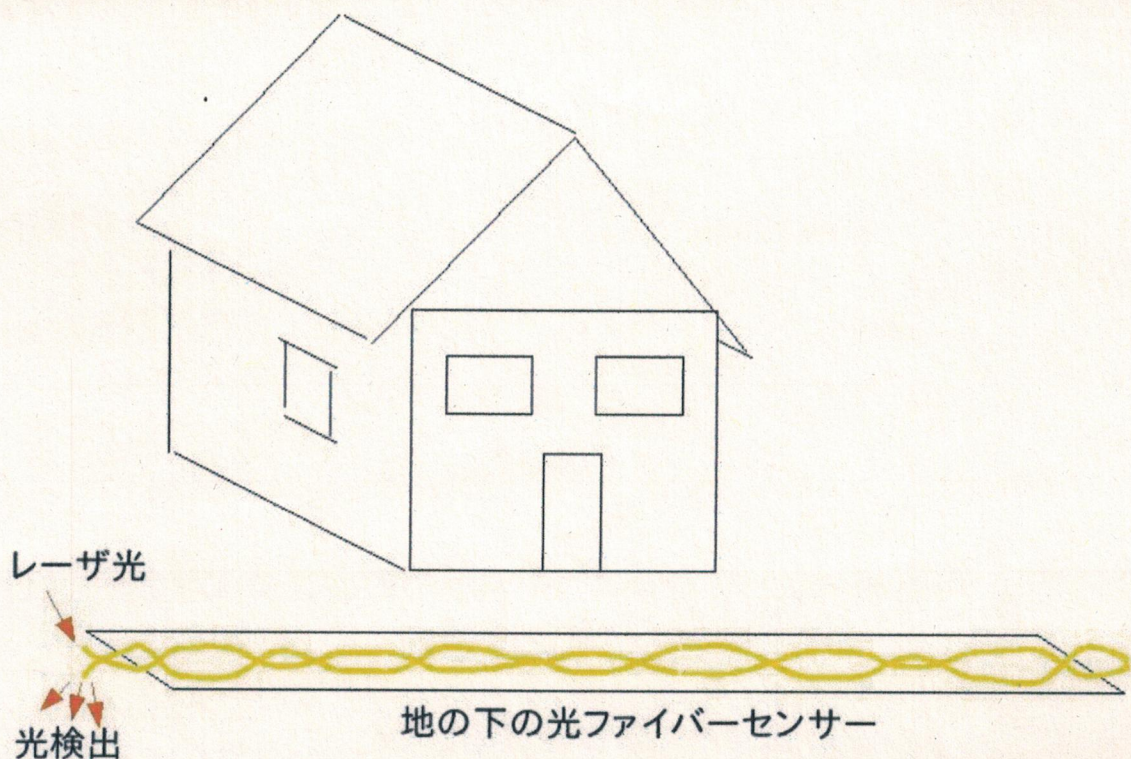


図16： 家に張る防犯センサー

家の周りの地下に光ファイバーセンサーを張り巡らせる。

3.2 課題点

一方の課題点は、第二章と第三章を通して主に二つ上がった。

一つは非常に不安定であるということである。2.1で述べたように、臨界角付近をとる円形からわずかに変化する場合は問題なく使える。しかし2.2のように円が変形するような変化になると非常に不安定な挙動に陥る。これはファイバー変形をセンサーとして利用できなくなるだけでなく、少しでも円が変形すると振舞い方や漏光量が変わってしまう。

つまりかなりデリケートなセンサーであるのだ。実用化においてはこれほどデリケートであるとセンサーとして有用であるとは言い難い。理論上では汎用性に優れているが、不安定であるという実際問題は、その汎用性を狭める要素となっている。

もう一つは鈍感ということである。

光ファイバーセンサーは測定物が軽過ぎると反応することができない。20gなど10g以上のものは反応できるが1gなど微量な質量のものは感知できない。マットの変化を感知するのだが軽量であるとマットはわずかにしか変形せず、その変形量では感知不可能なのだ。

またものが重すぎても感知できない。この場合、物理的強度は出てくる。が、ある程度の質量になるとマットの変形する量が限界以上になりその限界となるような

質量だと物理的強度が変わらなくなりセンサーとしての意味をなさなくなる。

第四章 総合考察

4.1 まとめ

通信手段の革新的なツールとして誕生した光ファイバー。近年その光ファイバーを振動感知の光電センサーとして、研究が行われている。そして我々は光が漏れる量の差を利用した円形ファイバーセンサーの開発研究を行った。

その開発のため、はじめに我々は円形ファイバーの原理について探求した。光が臨界角をこえることによって漏れる。これを利用するために円形がわずかに変形した時臨界角をわずかにこえるような半径を求めた。計算と実験両方の結果により、0.9cm という理想半径を得ることができた。

次にこの円形ファイバーセンサーの有用性を実証するための実験としてマットを作りそこで、エネルギー測定、ファイバーからの距離による依存測定、振動数測定を行った。結果、距離による依存は関係なく振動数も感知しなかった。そしてエネルギーの大きさには依存することが判明した。これらにより円形ファイバーセンサーはマットの形が変形することを感知していることがわかった。なお、円形ファイバーセンサーを直接押すと不可解な漏光をすることも実験により証明された。

この結果により、応用案として駅のホームの安全を守る為のセンサーと自宅の侵入と防犯のためのセンサー、二つの案を挙げた。しかし、非常に不安定であるセンサーだということと感度がよろしくないという欠点も出てきた。が、企業研究のレベルにおいて、不安点としては取るに足らないものであると言える。

4.2 展望

今後、この円形ファイバーセンサーを実用化をかなえるには3.2で述べたとおり安定性と感度の向上をしなければならない。

そのためには円形ファイバーセンサーとして使うという前提で開発された光ファイバーが不可欠となってくる。具体的にどういうものかというところから始め理想半径に固定されたファイバーをつくってあるものだ。

そしてマットの材質も見直さなければならない。わずかな質量で変形する材質を探求し、発見する。すると感度の改善をすることができる。

これらが改善されれば、円形ファイバーの実用化はまた一步近づくと我々は考えている。

参考文献

- [1] 野中 弘二 「光パルス相関信号を利用した広域分布型光ファイバセンサの最近の進展」(出版者：高知工科大学、雑誌名：高知工科大学紀要、7、1、2010)
- [2] <http://www.aisan.co.jp/products/pofeska.html>

謝辞

科学的知識が薄い私に一から指導し、研究活動に終始世話していただいたミケレット・ルジェロ先生、理想的半径の計算方法の探求に深く協力していただいた藤井先生、そして研究に詰まった際、様々なアドバイスを下さったミケレット研究室生にこの場を借りて礼を申し上げます。