

論文 光ファイバ計測原理を踏まえた計測手法の提案

鳥越 寿彦^{*1}

要旨：光ファイバ計測は、歪み、温度、損失等を計測する手法として様々な研究が進められている。中でも、B-OTDR 法は今まで計測することができなかった連続した構造物の歪みが計測できる手法として注目されている。筆者は都市トンネル二次覆工コンクリートの挙動監視手法として利用しているが、コンクリートのひび割れを高精度に検知するためには、現在確立されている計測精度をさらに向上させる必要があった。そこで、B-OTDR 法の計測原理に立ち戻り、計測手法を再検討した結果、計測に使用するセンサに応じた比例係数を設定することにより、歪み計測精度を向上できる手法を提案した。

キーワード：光ファイバ、計測、比例係数

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化を把握するためには、そのコンクリートの性状を的確に把握することが必要である。その目安として、目視点検によるひび割れ調査がある。点検対象物の量が少ない場合や、点検が容易な場所であればこの手法でも問題はないが、計測対象が広範囲やその量が膨大であった場合、コンクリートのすべての面を点検し、かつ、ひび割れ幅を把握することは現実的に困難である。そこで筆者は、コンクリートのひび割れを高精度に検知するため、光ファイバを用いた計測手法に着目して研究を行ってきた。

その中でも B-OTDR 法は、計測対象構造物の歪みを線的・面的に計測でき、新たな計測手法として注目されている。しかし、計測対象箇所にセンサを線的に設置するため、従来の点計測と違い、計測誤差を極力低減するための特別な補正方法を行わなければならない¹⁾

その際の最大誤差は $\pm 100 \mu$ であり、一般的にコンクリートの引張ひび割れが $150 \sim 200 \mu$ で発生することを考えると、これ以上に精度を向上させる必要がある。また、B-OTDR 計測手法の

原理の計測原理はまだまだ究明・解明されていない項目が多く、そのため、計測精度が向上できていないと考えられる。

そこで本研究では、B-OTDR 計測手法の原理に立ち戻り、計測精度向上方法について検討を行った。まず、計測原理について究明し、そのメカニズムにおいて計測精度を向上させる部分を摘出し、その関係を調べるための実験を行い、連続したコンクリート構造物のひび割れが検知できる計測手法を提案するものである。

2. B-OTDR の計測原理

2.1 B-OTDR 計測メカニズム

光ファイバ中に光を通すと、入射光と等しい周波数を持った強い弾性散乱（レーリー散乱）光と入射光の周波数からわずかに周波数のずれた極めて弱い非弾性散乱光が散乱する。この非弾性散乱光は、物質中の音波によって散乱するブリルアン散乱光と物質中を振動する原子やイオンによって散乱するラマン散乱光からなる。

その中でもブリルアン散乱光は、光ファイバ中に単色性（コヒーレンシー）の高い光を入射した際に発生する超音波と入射光のドップラー

*1 徳島大学大学院 工学研究科マクロ制御工学専攻 (正会員)

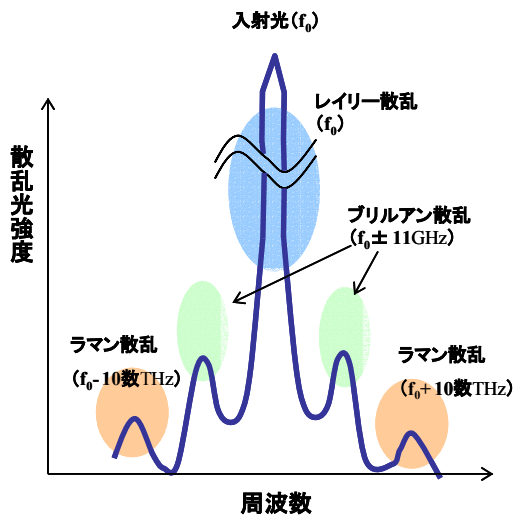


図-1 散乱光の種類

効果により発生するものである。光ファイバ中のブリルアン散乱光の場合、散乱原因である光ファイバ中の超音波が入射光から遠ざかる状態となるため、散乱光の周波数は約 11GHz（入射光の波長：1.55 μm の場合）低下する。（図-1 参照）

このブリルアン散乱光はレイリー散乱光に比べて2桁以上も微弱であり、これを高感度に検出するためには、コヒーレント検波（ヘテロダイン検波）が必要になる。ここで、ブリルアン周波数シフトは式(1)で与えられる。

$$f_B = 2nV_A / \lambda \text{ (MHz)} \quad (1)$$

n : 光ファイバの屈折率

V_A : 音速(m/s)

λ : 入射光の波長 (μm)

図-2 から B-ODTR 測定原理の手順を示す。

レーザからの出力光を光合分波器で測定用光源 (f_0) とコヒーレント検波用参照光 (f_0) に分波する。コヒーレント検波では、ブリルアン散乱光と参照光の周波数差をほぼ等しくする事で高精度に計測できるため、あらかじめ、光周波数変換器を用いて高周波側にシフト（約 +11GHz）させたパルス光を光ファイバに入射する。光ファイバに入射したパルス光は、後方散乱光として戻ってくるため、光合分波器で分波し、コヒーレント検波回路で電気信号として検出する。

ブリルアン散乱光は、入射パルス光 (f_0+f_1) に対してブリルアン周波数シフト f_B だけ周波数シフトしているため、入射パルス光 (f_0+f_1) とローカル光（基準光） f_0 の周波数差 f_1 をブリルアン周波数シフト f_B に一致させることによりブリルアン散乱光のみを検出することができる。ここで、計測対象物に設置したセンサが最大受光レベルとなるスペクトラム分布を測定できるように周波数帯域を設定し、かつ、各周波数におけるブリルアン散乱光を測定する。この状況を表しているのが図-3 である。

この結果から各測点におけるブリルアン周波数シフト量が測定できる。このブリルアン周波数シフト量の測定が B-OTDR 計測のメインを占めている。次にブリルアン周波数シフト量に比例係数を用いて歪みに変換する。この関係は式(2)であらわせられる。

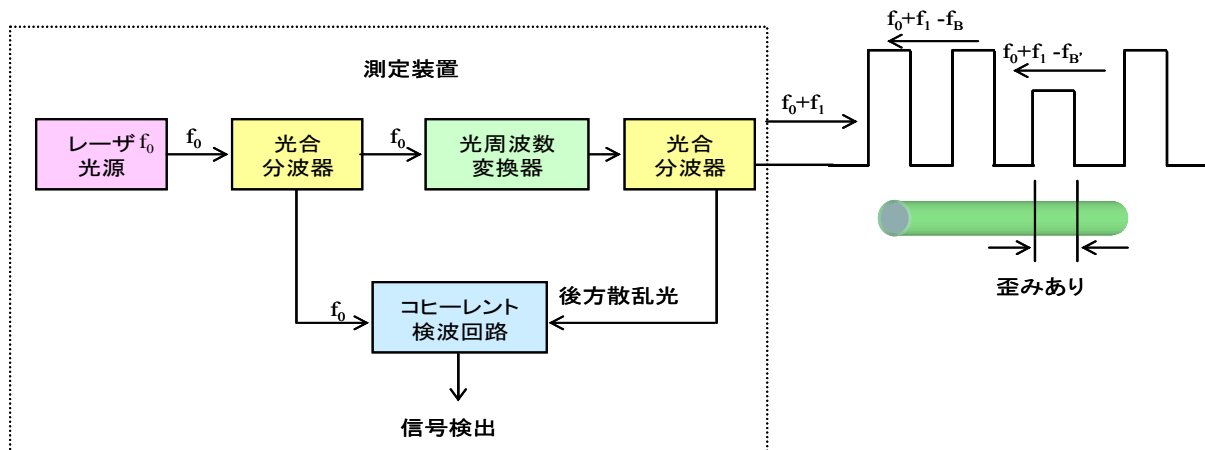


図-2 B-ODTR 測定原理

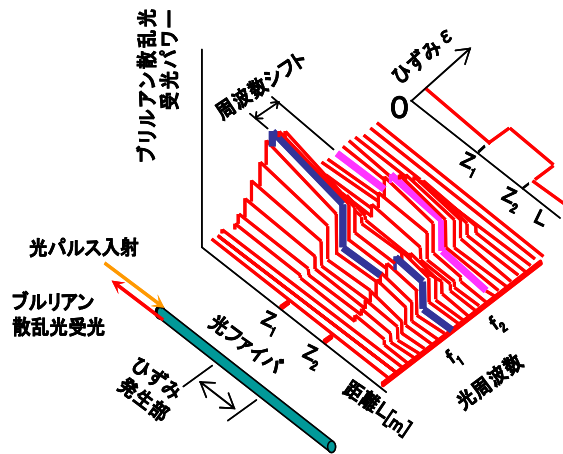


図-3 ブリルアン散乱光計測波形

$$f_{B'} = f_B (1 + C \cdot \varepsilon) \quad (2)$$

$f_{B'}$: 歪みが生じたときのブリルアン周波数シフト(MHz)

f_B : 歪みがゼロの時のブリルアン周波数シフト(MHz)

C: 比例係数

ε : 歪み量(%)

この時の比例係数の関係を図-4に示す。

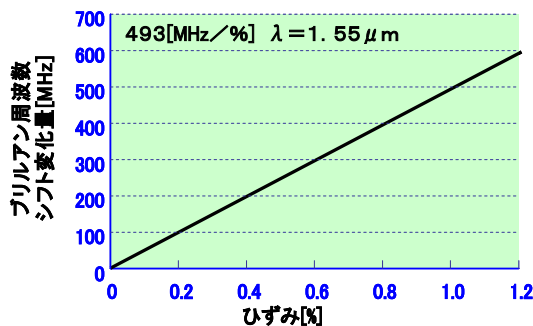


図-4 比例係数関係式

2.2 新しい計測装置

現在、この B-OTDR の新たな方式として、精度が高く経済的な装置が開発された。それは、従来の光周波数変換回路を取り除き、光と電気方式によるコヒーレント検波方式を取り入れたものである。(図-5 参照)

これにより、高価な光周波数変換装置が不要になり、2段階のコヒーレント検波を行い、安定した計測が可能となった。計測原理は若干変わったが計測の基本的内容は変わっていない。

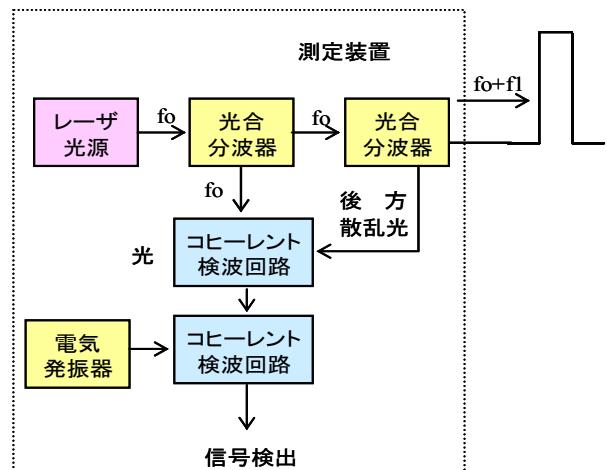


図-5 新しい装置の原理

2.3 計測条件の設定

B-OTDR の計測を行うにあたり、計測者が条件設定する項目がある。中でも、計測原理に関連する項目は、計測結果及び計測精度への影響度が非常に高い。

計測設定条件項目は、10 数項目あるが、計測結果により大きな影響を与える項目は以下の2項目である。

1 項目目は、最大受光レベルとなるスペクトラムの測定である。この際、計測用センサの設置条件及び今後の変動量に合わせて周波数帯域を設定し、それに合わせて基準光の各周波数を可変させて計測を行うが、その範囲を間違えないようにしなければ計測値が全く違ったものになってしまう。しかし、これらは計測用センサの設置状況及び計測結果のデータを基にして計測時において設定変更が可能であるため、データ検証を万全に行える光ファイバに精通した技術者であれば致命傷にはならないと考える。

ここで問題となるのが、もう一つの項目である、「比例係数」である。(図-4 参照) この係数は、この装置を開発するにあたり数々の光ファイバ心線を用いて分析した結果からあらかじめ機器に設定されているものであり、ブリルアン周波数と歪みの関係式でのキーポイントである。(比例係数は条件設定で変更可能な項目)

筆者は、過去に様々なセンサを用いて計測を行ったが、この係数はすべて初期設定のまま一

定であった。この比例係数は計測条件の一つであるため、少し設定を変えると計測値は簡単に変動してしまう。そこで、その比例係数を確認するために実験を行った。

3. 実験概要

実験に用いた光ファイバセンサは、4芯のテープ型光ファイバの両端に0.15mmのステンレス鋼2本のテンションメンバで構成されている、B-OTDRの計測用として専用開発されたものである。通信用の光ファイバと違い、テンションメンバに伝達された外力を光ファイバ心線に伝達する構造になっている。このセンサを治具で固定し、可動部を伸縮させその伸縮量をダイヤルゲージで計測して理論値とし、その状態をB-OTDRで計測して両者を比較することにした。

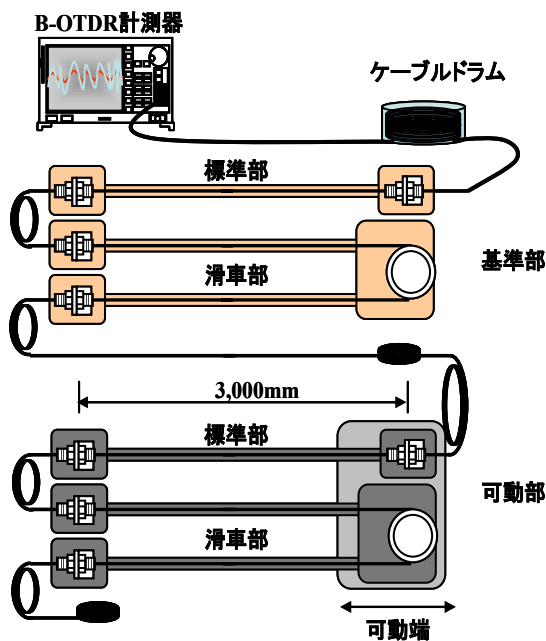


図-6 実験モデル

また、温度変化及び計測時に発生するひずみ表示再現性バラツキ（ドリフト）に対応するため、治具の側部に基準点を設けて計測を行った。

3.1 実験モデル

実験モデルは、長さ3,000mmの鋼材にB-OTDRセンサを固定でき、可動部を1/100mm単位に移動できる機能を持つ。また、その側部には、両端を固定できる基準点があり、温度変化やドリフトをキャンセルできる機能を持っている。この治具にB-OTDRセンサを図-6に示すように一筆書きで設置し、1回の計測で基準部と可動部の両方を同時に計測できる構造とした。

3.2 実験方法

B-OTDR法は、トンネル等線状構造物の覆工コンクリートのひび割れを検知することを目的にしている。そこで、実現現場でのセンサ設置方法と同様に、ある一定の区間長が確保できるように両端でセンサを固定し、その区間長に発生したひび割れ変化量を計測することができるモデルとした。（図-6参照）

実験治具が最大3,000mmであることから、その間隔を少なくすること、並びに固定治具の端部に滑車を用いて距離を倍増させる2パターンを併用した計測を行うことにした。その際、計測器の距離分解能を考慮した。

計測器の距離分解能は、パルス光のパルス幅に依存され、今回は最も高精度のパルス幅(10ns)を用い、最小幅の1mとなるように設定した。

計測パターンは、1パターンの計測で規定量まで数回に分けて伸ばし、その後同回数で元

表-1 計測パターン

計測パターン	伸縮量(mm)	範囲(mm)
1,000mm	0.5	2.0 (標準)
2,000mm	0.5	4.0 (標準)
3,000mm	1.0	6.0 (標準)
4,000mm	0.5	4.0 (滑車)
6,000mm	1.0	6.0 (滑車)

戻す計測を繰り返し行った。1回の変化に対しダイヤルゲージの数値が安定後、3回計測を行い、その平均値をその回の計測値とした。実

際に行った計測パターンを表-1に示す。

ここで、(標準)は両端固定治具の、(滑車)は片側が滑車の状態での計測を示す。

計測パターン1mの例を示すと、計測スパン長は1,000mm、可動部の伸縮量は0.5mmずつ4回で2mmまで伸ばし、その後同様に収縮させる。この変化量をダイヤルゲージにて計測し、その値を理論値(真値)とし、実測したスパン長から歪み値へ換算し計測値との照合を行った。

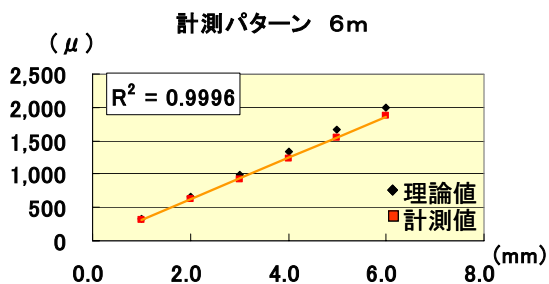
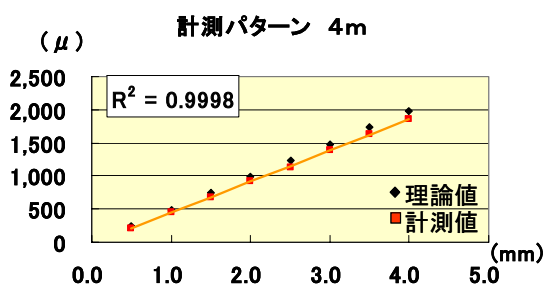
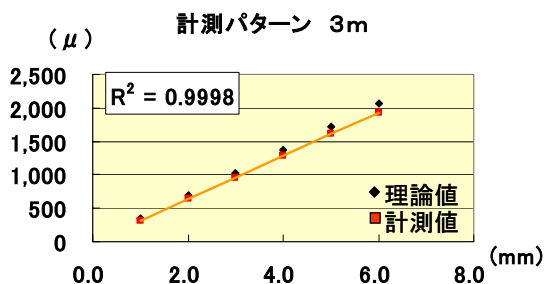
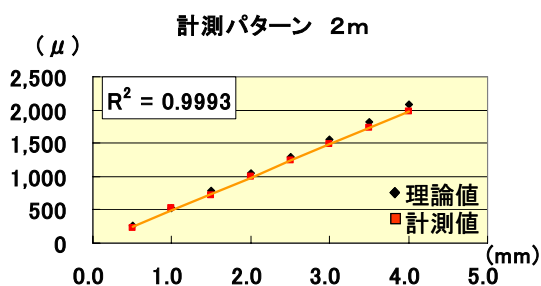
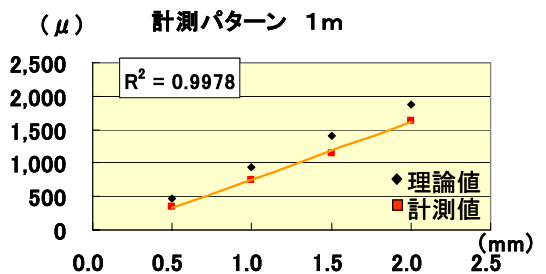


図-8 分析結果

4. 実験結果

実験で設定した5つの計測パターンについて理論値と計測値の分析を行った。図-8にその結果を示す。この際の比例係数は図-4の係数を用いた。

この結果を見ると計測値は必ず理論値を超えることなく全てが下回った結果となっている。また、それらは計測誤差等のバラツキではなく、直線性のある計測値である事が R^2 (最小二乗値)の値から予想できる。そこで、再度、状況を確認するために、計測時の伸縮量を変化させた詳細実験を行った。

4.1 詳細実験

計測パターンは、2mとし、その他の計測条件を表-2に、分析結果を図-9に示す。

表-2 詳細実験条件

伸縮量(mm)	範囲(mm)
0 ~ 1 mm	0. 2 mmピッチ
1 ~ 3 mm	1. 0 mmピッチ
3 ~ 4 mm	0. 2 mmピッチ

伸縮量が少ない状態ではあまり把握できないが、伸縮量が多くなるとその状態は顕著に表れている。また、 R^2 の数値を見ても直線性があり、計測結果にバラツキがあるとは考えがたい。そこで、この計測結果のデータを用いて、比例係数を逆算する事にした。

後方散乱光としてブリルアン周波数がシフトする量は約11GHzであるため、その数を中心と

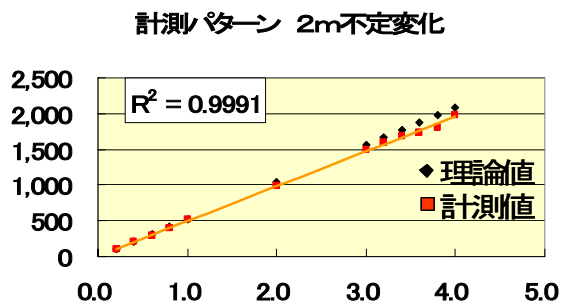


図-9 詳細実験結果

して周波数帯域を設定する。今回の計測では、11.60~12.30GHzを10MHzピッチで計測した。

比例係数493MHzで1% (10,000 μ)である関係から、今回の計測値の周波数分布を分析すると、5.8~103.9MHzの分布となった。ここで、その周波数分布とR²の傾きを確保し、比例係数を

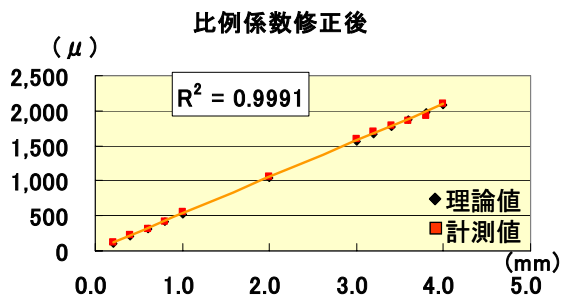


図-10 比例係数修正後

変更して詳細実験を繰り返し実施した。

収束した結果を図-10に示す。また、計測値のバラツキについて整理すると、従来の比例係数の場合、理論値とのバラツキ(誤差含む)は $\pm 87\mu$ であったが、収束後は $\pm 41\mu$ であった。計測機器として公表している誤差が0.004%

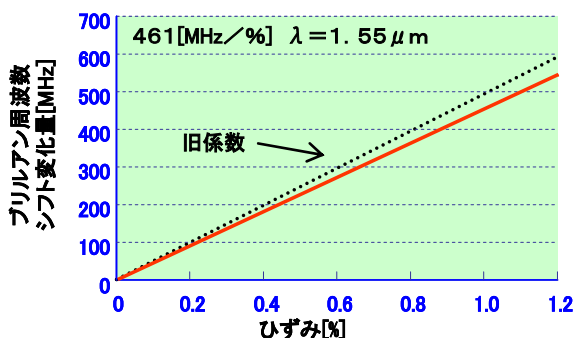


図-11 新たな比例係数

(40 μ)であるため、これらを十分満足していると考える。

この結果から比例係数関係式を逆算すると、図-11のようになる。今回使用したセンサは、光ファイバ心線をポリエチレンで包み込み、両端のテンションメンバで張力を伝達する構造になっているが、外力が中の光ファイバ心線に完全に伝達できなかったと考える。そのため、理論値に比べて計測値が必ず下回る結果になったと考える。(図-12参照)

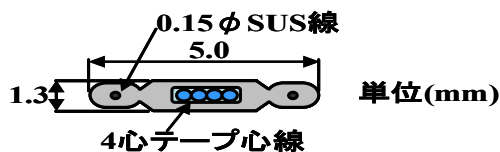


図-12 光ファイバ断面形状

5. まとめ

- (1) 周波数帯域の設定は、現地での光ファイバ設置条件及び計測原理に精通した者が行う必要がある。光ファイバの計測時に設定する条件は多数あるが、ほとんどの条件は、計測結果のデータから修正が可能である。しかし、計測原理等の知識がない場合、全く違ったデータになる可能性が高い。
- (2) 比例係数は現地に光ファイバセンサを設置する前に、確認実験を基に設定する必要がある。比例係数を変更しなかった場合、センサ形状により実際の歪み量より過少に表示される可能性が高い。
- (3) 比例係数のデータを収集分析し、理論値と計測値の整合性を図っていき、より高い精度での計測を実現していきたい。

参考文献

- 1) 鳥越 寿彦, 川野 勝: ブリルアン散乱光を用いたひずみ分布測定精度向上手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.2037-2042, 2004
- 2) 安藤電気株式会社: 光ファイバ歪みアナライザ取扱説明書