

パルス・プリポンプ方法を用いた高分解能ブリルアン計測の理論検討

岸田 欣増[†] 李 哲賢[†] 林 縄績[†] 西口 憲一[‡]

[†]ニューブレクス(株) 〒650-0045 兵庫県神戸市中央区港島 9-1 KIO315

[‡]三菱電機(株) 〒661-8661 兵庫県尼崎市塚口本町 8-1-1

E-mail: [†]kishida@neubrex.jp, [‡]Nishiguchi.Kenichi@wrc.melco.co.jp

あらまし パルス幅が従来よりも一桁小さい1nsまでのBOTDA計測の可能性がBaoらにより実験的に示された。ただし、その手法では、(a)計測対象によって計測条件の設定を変えなければならない、(b)長距離計測時には信号が埋もれてしまう、という問題点がある。本報告では、これらの問題を克服するために、通常の光パルスに先立ち一定の長さを持つプリポンプパルスを送出させるブリルアン計測方式を提案する。このプリポンプ光を用いる方法により、計測する距離に依らず常に高分解能のブリルアン計測が可能になることを、解析的に明らかにする。さらに、この方法を用いた場合の歪み計測精度、計測距離などについてもシミュレーションにより検討する。

キーワード プリポンプ, ブリルアン線幅, 高分解能, フォノン遅延時間

Pulsed pre-pump method to achieve cm-order spatial resolution in Brillouin distributed measuring technique

Kinzo KISHIDA[†] LI Che-Hien[†] Shengbin LIN[†] and Ken'ichi NISHIGUCHI[‡]

[†]Neubrex Co., Ltd KIO315 9-1 Minatojima, Chuou-ku, Kobe, Hyougo 650-0045 Japan

[‡]Mitsubishi Electric Co. 8-1-1 Tsukaguchihonmachi, Amagasaki-shi, Hyogo, 661-6881 Japan

E-mail: [†]kishida@neubrex.jp, [‡]Nishiguchi.Kenichi@wrc.melco.co.jp

Abstract Distributed Brillouin scattering sensing that uses a pulse width down to 1ns, which is one order of magnitude lower than currently available commercial BOTDA, was successfully examined in experiments by Bao et al. However, there are two problems in commercializing this technique: a) experimental settings must be changed each time the measurement is to be carried out on different objects, and b) the signal gets buried in the noise in long-range measurements. This paper introduces a method using a pre-pump pulse in front of a traditional laser pulse. Theoretical analysis of this new method shows that a cm-order distributed measurement can be realized that is free of fiber length. Accuracy of strain, distance limit, etc, are also quantitatively evaluated.

Keyword pre-pump, Brillouin band width, cm-order distributed measurement, phonon relaxation time

1. はじめに

光ファイバのブリルアン散乱を利用する歪み分布計測において、近年、センチオーダーの空間分解能の実現をめざした研究が進められている[1]~[4]。この試みの一つとして著者らはBOTDA(Brillouin optical fiber time domain analysis)やBOTDR(reflectometry)の信号を解析して分解能を上げる方法を提案した[1]。一方、Baoら[2,3]は、信号計測値から直接、分解能が10cm以下の局所的な歪み情報を取得する方法を提案し、実験的に検証している。

Baoらの方法は従来からBOTDAに使用されている光パルスに加えて漏れ光(light leakage)を積極的に利用するものである。この漏れ光はパルスと同じ周波数をもつCW波になる。何故このような方法で分解能が向上する効果が得られるのかということについて著者ら

は解析的に検討し、理論的にその理由を明らかにした[4]。要約すれば次のようになる：漏れ光がある場合には信号中に(1)漏れ光とプローブ光との相互作用によるフォノンの励起、(2)パルスとプローブ光の間でのエネルギーの授受、の2つの過程が結合した成分が出現して高解像度の歪み計測が可能になる。しかしながら、信号中には他の抑圧したい成分も含まれており、特に、漏れ光とプローブ光とのエネルギーの授受による成分は光ファイバの長さと関係する。そのため漏れ光を利用するだけでは、(a)計測対象が異なると設計パラメータをチューニングし直す必要がある、(b)長距離の場合には抽出したい信号が埋もれてしまう、という問題点がある。実験上でもこのような現象が観察されている。

本報告では、このような問題点を克服するために、

階段状のパルスをポンプ光として用いる方法を提案する．階段状のパルスは，解像度に見合った短い光パルスとそれに先だって送出するある長さをもつプリポンプパルスからなる．この方法を用いることにより，計測対象の長さによらず，センチオーダの高分解能の歪み計測が可能になることを解析によって明らかにする．また，この方法で実現できる歪み計測精度，計測距離についてもシミュレーションにより検討する．

2. パルス・プリポンプ方法の基礎理論

本報告で提案する歪み計測方式を図1に示す．ポンプ光に階段状のパルスを用いることがこの方式の特徴である．

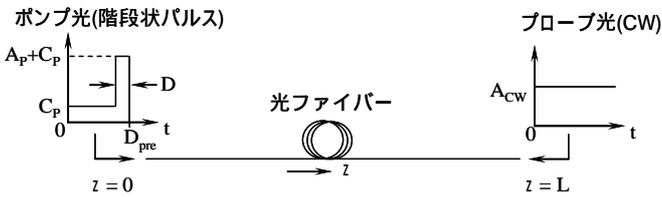


図1 提案する歪み計測方式

プリポンプ光として用いる光を

$$A_p(t) = \begin{cases} A_p + C_p, & D_{pre} - D \leq t \leq D_{pre} \\ C_p, & 0 \leq t \leq D_{pre} - D \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (1)$$

と表わす．ここで， A_p と C_p はそれぞれポンプ光とパルス・プリポンプ光の振幅を表す． $A_p(t)$ の消光比は(2)式で表す．

$$R_p = \left(\frac{A_p + C_p}{C_p} \right)^2 \quad (2)$$

光ファイバに歪みがある場合の散乱光の振幅は，Brillouin 散乱方程式系を摂動法で解くことにより

$$E_{CW}(0, t) = A_{CW} [1 + \beta H(t, \Omega)] \quad (3)$$

と表わされる[4]．ただし，ここで $E_{CW}(z, t)$ はcw光の振幅、 β は摂動パラメータで， $H(t, \Omega)$ は後述するような時間と周波数の関数である．これらの意味は文献[4]に示した．実際に観測されるのはプローブ光のパワーである．誘導ブリルアン散乱の利得は散乱がない場合のプローブ光のパワーからの増加分として次のように表わされる．

$$V(t, \Omega) = \frac{1}{2} \beta A_{CW}^2 H(t, \Omega) + c.c. \quad (4)$$

(1)式のポンプ光を用いた時，(4)式の右边に含まれる成分は次のように4つの項に分解される[4]．

$$H(t, \Omega) = H_1(t, \Omega) + H_2(t, \Omega) + H_3(t, \Omega) + H_4(t, \Omega) \quad (5)$$

ただし、

$$H_1(t, \Omega) = A_p^2 \int_{\nu_g(t-D_{pre})/2}^{\nu_g(t-D_{pre}+D)/2} \int_0^{t-D_{pre}+D-2z/\nu_g} h(z, s) ds dz \quad (6.1)$$

$$H_2(t, \Omega) = A_p C_p \int_{\nu_g(t-D_{pre})/2}^{\nu_g(t-D_{pre}+D)/2} \int_0^{t-2z/\nu_g} h(z, s) ds dz \quad (6.2)$$

$$H_3(t, \Omega) = A_p C_p \int_{\nu_g(t-D_{pre})/2}^{\nu_g(t-D_{pre}+D)/2} \int_0^{t-D_{pre}+D-2z/\nu_g} h(z, s) ds dz \quad (6.3)$$

$$H_4(t, \Omega) = C_p^2 \int_{\nu_g(t-D_{pre})/2}^{\nu_g t/2} \int_0^{t-2z/\nu_g} h(z, s) ds dz \quad (6.4)$$

ただし、

$$h(z, s) = \Gamma e^{-[\Gamma + i(\Omega_B(z) - \Omega)]s} \quad (7)$$

であり， L は光ファイバの長さを， $\Omega_B(z)$ はBrillouin 散乱の中心周波数を表わす．また， $\Gamma = \Gamma_B/2$ であり， Γ_B はスペクトルの半値全幅（FWHM:full width at half maximum）に等しく，フォノンの寿命とは

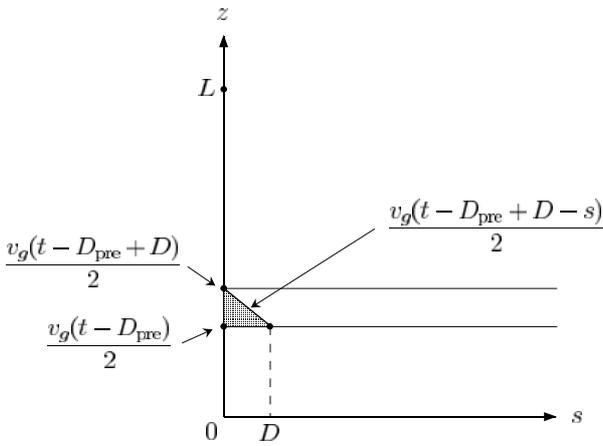
$$\tau_B = 1/\Gamma_B \quad (8)$$

で関係付けられる．以降，典型的な $\Gamma_B = 35\text{MHz}$ という値を用いて検討を進める．

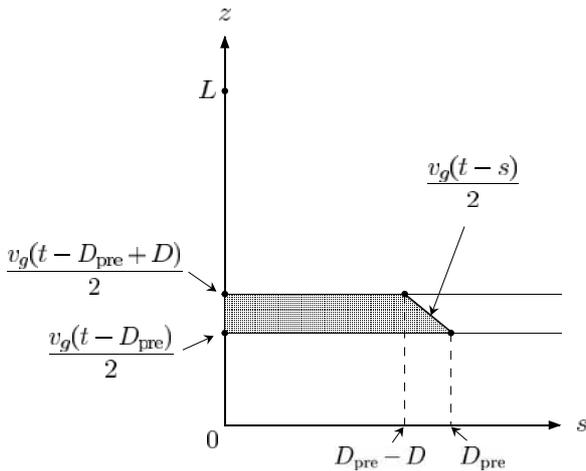
(5)式の各項は(6)式からわかるように，すべて時間・空間の2次元平面での積分で表わされ，積分域は図2に示すようになる．時間方向の積分はフォノンの励起に，空間方向の積分はポンプ光からプローブ光へのエネルギーの転移に対応する[4]．

H_1 と H_3 ではフォノンはポンプ光のパルスとプローブ光により励起される．したがって，もしポンプ光のパルス幅 D が音波の立ち上がり時間 τ_B よりも短ければパルス内で音波は十分に成長することができない（図2(a), (c)参照）．一方， H_2 と H_4 においてはフォノンはポンプ光のプリポンプパルスとプローブ光によって励起される．したがって，プリポンプパルスがー

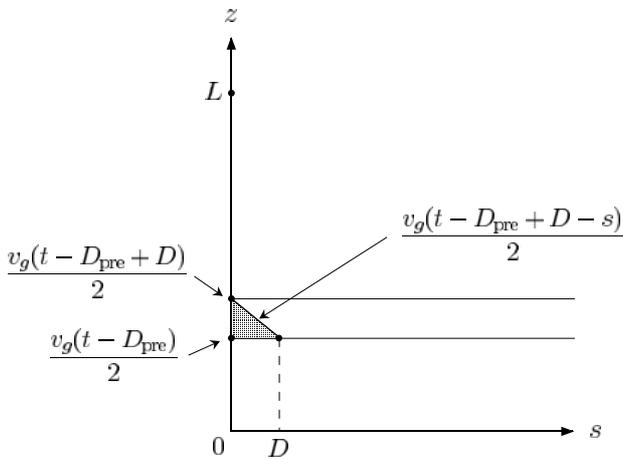
定のパワーと十分な幅を持ってれば，フォノンはい
つでも十分に励起された状態になる．



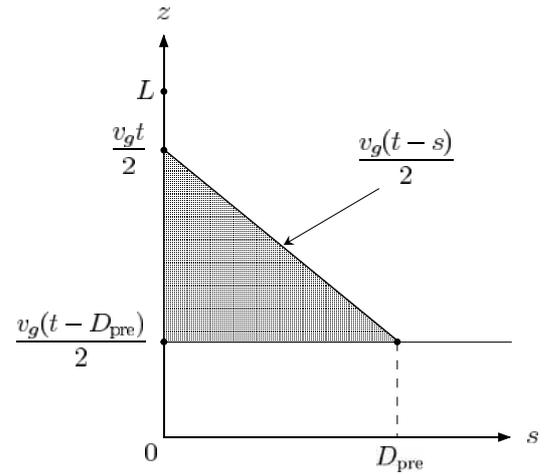
(a) H_1



(b) H_2



(c) H_3



(d) H_4

図 2 $H_n, n = 1, 2, 3, 4$ の積分範囲

各成分の分解能は， z 方向への積分幅で決まる．す
なわち， H_1 と H_2 は D の大きさの分解能になる．

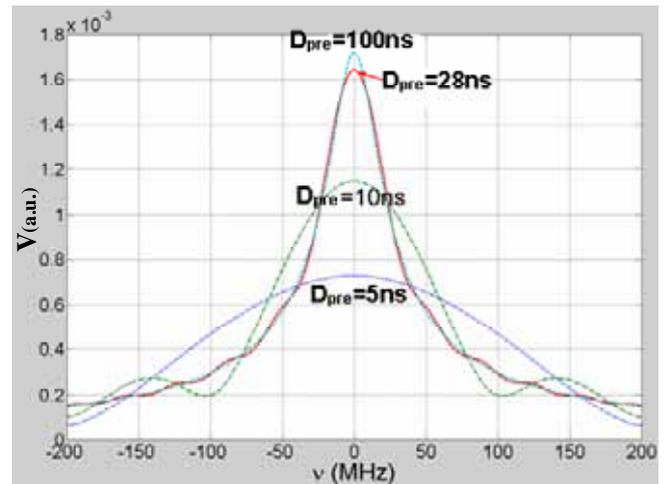


図 3 パルス幅とブリルアンスペクトル

以上のことから， H_2 という成分は D の大きさの分
解能を持ちながら， D_{pre} の時間 幅でフォノンを励起
させるようになっている．したがって， $D \ll D_{pre}$ と
なるように 設定すれば， H_2 は局所的な情報だけを含
みかつスペクトルの線波がひろがらないとい う，歪み
計測/温度計測に極めて望ましい性質を持つことがわ
かる．

D_{pre} をどの程度長くすれば良いか調べるために，
(4)式のススペクトルの広がり方を計 算したのが図 3
である．ただし，ここでは $D = 1\text{ns}$ (10cm の分解能に
対応)として 計算を行なった．この図から， $D_{pre} = 28$
 ns とすればフォノンがほぼ完全に励起さ れ，スペク
トルの線幅は自然な線幅の 35MHz になることがわ

かる．実際には，完全に 35 MHz まで線幅を抑える必要はなく， D_{pre} を長くしすぎると H_2 以外の成分がスペクトルを歪ませる可能性もあるから， D_{pre} は調整して適切な値に設定することになる．

解析例として， $D=1\text{ns}$ ， $D_{pre}=13\text{ns}$ ， $R_p=25\text{dB}$ の条件を使って，図 4 に示した計測ファイバで解析を行った．3.05m 所の局所的な情報（誘導ブリルアン散乱光のスペクトラム）を(2)，(5)，(6)式を用いた計算した．図 5 (a) は各要素に対応するスペクトルであり，図 5 (b) はそれらの和としてのブリルアン利得スペクトルを示す．

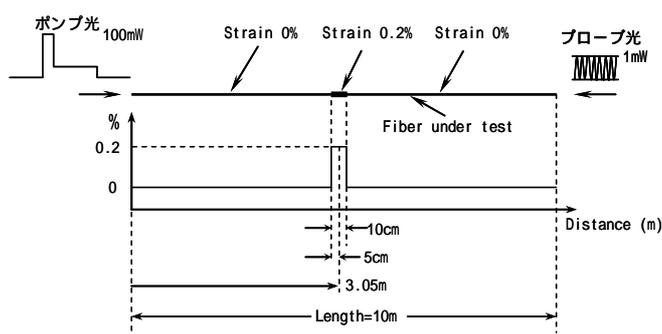
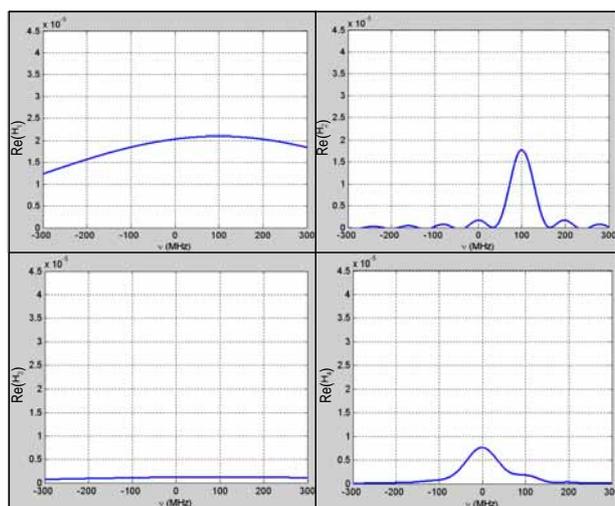
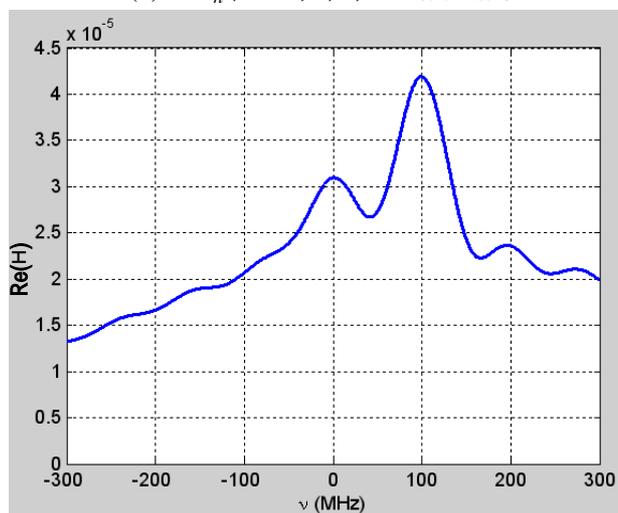


図 4 解析条件



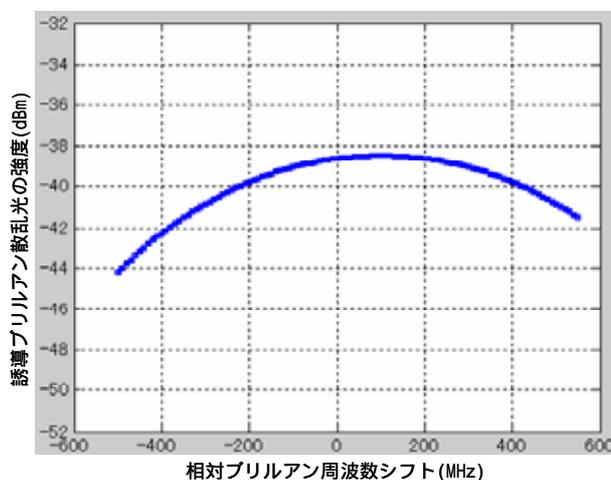
(a) $H_n, n=1, 2, 3, 4$ の解析結果



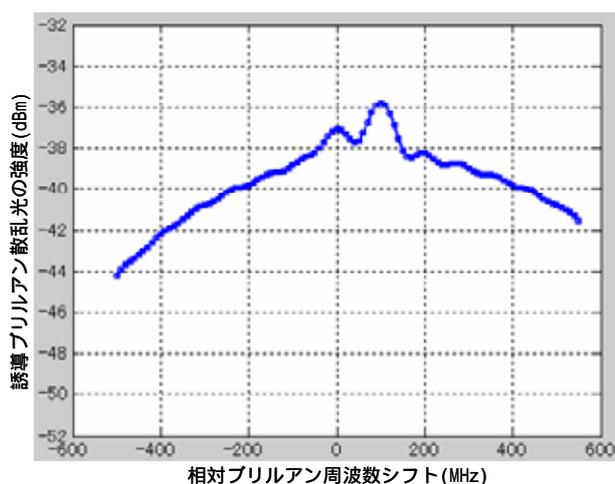
(b) H の波形

図 5 3.05m の計算結果

結果を見やすくするために，図 6 (b) には図 5 (b) の利得スペクトルを対数スケールでプロットしてある．また，図 6 (a) にはプリパンプ光を使わない場合，すなわち， $R_p =$ の場合のスペクトルを対数スケールでプロットしてある．なお，図 6 では，従来の実験結果との比較によりレベルに補正を加えて，縦軸の値が実測する際の絶対レベルと等しくなるようにしてある．図 6 の 2 つの図を比較することにより，従来の単一のパルスでは達成できなかった 10 cm の空間分解能がプリパンプ方式を用いることで達成できることがわかる．



(a) 3.05m の誘導ブリルアン散乱光のスペクトラム (従来の方式)



(b) 3.05m の誘導ブリルアン散乱光のスペクトラム (パルス・プリパンプの方式)

図 6 絶対レベルの解析結果

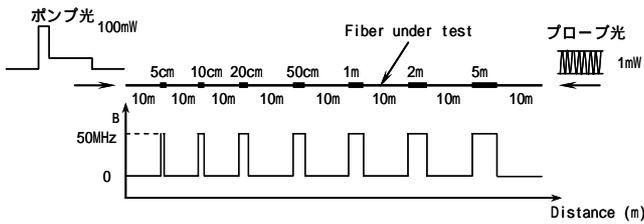
3.歪み計測精度の検討

ブリルアン周波数シフトの大きさは歪みの大きさに比例することから、歪み計測精度はブリルアン周波数シフトの計測精度に比例する。受光回路の雑音のみを考慮したときのブリルアン周波数シフトの計測精度は次式で表わされる [5]。

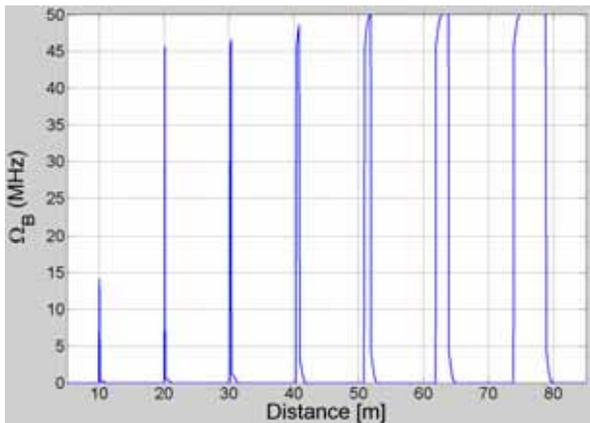
$$\delta\nu = \frac{\Gamma_B}{\sqrt{2} \times \sqrt[4]{SNR}} \quad (9)$$

ここで SNR は受光回路の信号対雑音比である。パルス幅が 1ns の場合、図 6 (b)の結果から Γ_B は 60MHz になり、SNR が 45dB であれば、 $\delta\nu$ は 2.5MHz (50 μ) となる。

(9)式で表わされる誤差はランダム誤差である。ブリルアン周波数シフトの測定値がバイアスをもつことが予想される。そのバイアスの程度を調べるために、最悪条件下でのシミュレーションを行なった。その条件と結果を図 7 に示す。



(a) 条件



(b) 結果

図 7 解析の条件と結果

図 7 (a)に示すように、光ファイバには 10m おきに歪みのある区間を設け、各区間の幅は 5cm から 5m まで変化させてある。光ファイバ全体としては歪みのない (ブリルアン周波数シフトが 0MHz) の区間が大部分

を占めるから、スペクトルを空間的に平均化したスペクトル成分 H_4 の中心は 0MHz のところにあり、その半値幅は 100MHz 程度になる。 H_2 のスペクトル成分は、その上にある形になるが、 H_4 のスペクトルの傾きが一番急な 50MHz のあたりにのるときに、バイアス誤差が最大になるはずである。そこで、各歪み区間の周波数シフト量は 50MHz と仮定してある。このような最悪の条件のもとで、周波数シフトの計測値を求めたものを図 7 (b)に示す。なお、ここではスペクトルのピーク的位置を周波数シフトの計測値としてある。この図からわかるように、計測した周波数シフト量は下にバイアスもち、そのバイアスは歪み区間の幅が狭くなるほど大きい。歪み区間の幅が 10cm の場合には、計測した周波数シフトは 46MHz になる。 $d\Omega_B / d = 500\text{MHz} / \%$ という関係を用いて歪みに換算すると、計測誤差は $\pm 0.0025\%$ から $\pm 0.0082\%$ に増大する。

このように、歪み区間が狭い場合には歪みの計測値にバイアスがのる傾向があり、何らかの対策が必要である。この対策としては例えばファイバセンサ (H_4 の拡散信号を小さくさせる) に工夫する、スペクトラムの形 (3dB ダウン所のレベル差を利用する) を用いて補正をかける、といったことが考えられる。

4.漏れ光の影響

前節までの解析モデルの階段状パルスでは、漏れ光の影響は考慮していなかった。光ファイバがそれほど長くなければ漏れ光の影響は無視できるが、長距離の計測に際しては累積効果のために無視できないものになる。そこで、定常的な漏れ光の影響を考慮して、図 8 のモデルで検討を行なった。

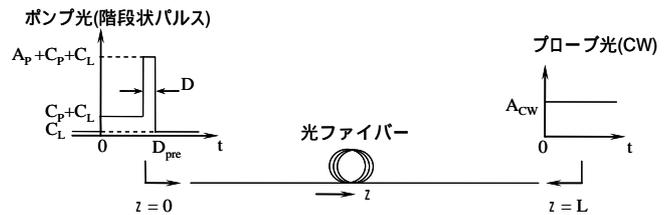


図 8 漏れ光を考慮した解析モデル

この場合、ポンプ光は次式のように表現される。

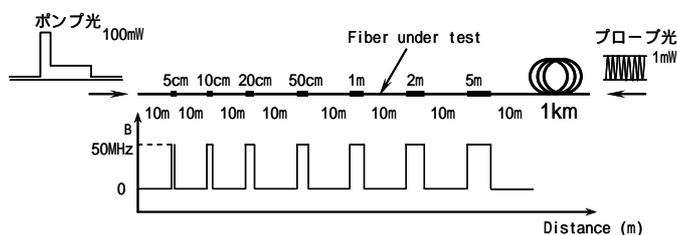
$$A_P(t) = \begin{cases} A_P + C_P + C_L, & D_{pre} - D < t < D \\ C_P + C_L, & 0 < t < D_{pre} - D \\ C_L, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 C_L は使用する光スイッチの漏れ光の振幅とする。

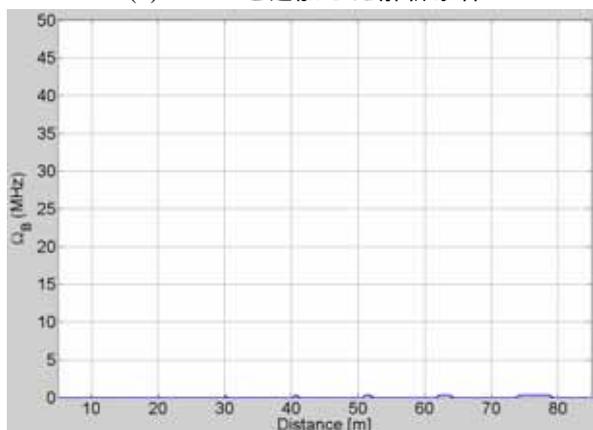
この場合の消光比は次式で定義する。

$$R_X = \left(\frac{A_P + C_P + C_L}{C_L} \right)^2 \quad (12)$$

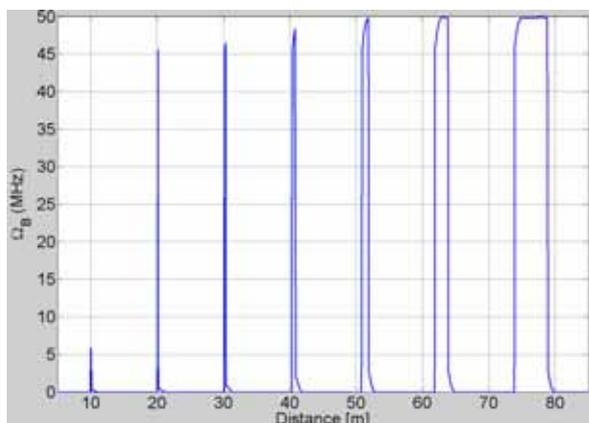
長距離計測を模擬するために、図9(a)に示したようにポンプ光端に1kmの歪みのない区間を付加した。この条件のもとで2通りの R_X (a: $R_X = 45\text{dB}$, b: $R_X = 65\text{dB}$)に対して各々にシミュレーションを行なった。その結果を図9(b),(c)に示す。図9(a)からわかるように、 $R_X = 45\text{dB}$ の時には局所的な情報が C_L によって拡散されて、局所的な情報は埋もれてしまい、周波数シフト量を計測することができない。一方、図9(b)からわかるように、 $R_X = 65\text{dB}$ まで C_L を抑えると、局所的な情報が保たれて漏れ光がない場合と同じ計測結果が得られる。



(a) 1kmを追加した解析条件



(b) $C_X = 45\text{dB}$ の解析結果



(c) $C_X = 65\text{dB}$ の解析結果

図9 定常漏れ光を考慮した解析の条件と結果

このように、長距離の計測を行なう場合には漏れ光は低く抑える必要がある。距離が長くなるほど許容できる漏れ光の水準は低くなるから、いかに漏れ光を抑えるかということが今後の課題になる。

5.まとめ

センチオーダの高分解能ブリルアン計測を実現する方法として、パルス・プリパンプ BOTDA 方式を提案し、その性能を解析的に評価した。その結果、以下のようなことがわかった。

- (1) 提案したパルス・プリパンプ方式では2段階の階段状パルスを用いるが、これによりフォノンを十分に励起させ、かつ光ファイバ内の局所的な情報を取り出すことができる。
- (2) この方法では、2段階のパルスのそれぞれの長さや振幅パワーが設計パラメータとなるが、それらを定量的に検討して、実現性があることを明らかにした。

今後、高分解能(10cm)と高精度($\pm 25\mu\text{m}$)のPPP-BOTDA (Pulsed Pre-pump Brillouin Optical Time Domain Analysis)の装置化を図ると共に、装置に適合するファイバセンサの開発、施工、解析などへ力を注ぐ予定である。

謝辞 本研究を進めるうえで有益な助言を頂いたOTTAWA 大学 X.Bao 教授に深謝致します。

文献

- [1] Xin-Zen, Li, and Shiro Takada, "A new technique for fine special resolution BOTDA," OFS-2000, 14, pp.839-842, 2000. (Xin-Zen Li is the same person as Kinzo Kishida).
- [2] X.Bao and A.Brown, M.DeMerchant, J.Smith, "Characterization of the Brillouin-loss spectrum of single-mode fibers by use of very short(<10ns)pulse", OPTICS LETTERS, Vol.24, No.8, April 15, 1999
- [3] V.Lecoeuche, D.J.Webb, C.N.Pannell, and D.A.Jackson, "Transient response in high-resolution Brillouin-based distributed sensing using probe pulses shorter than the acoustic relaxation time", OPTICS LETTERS, Vol.25, No.3
- [4] 西口憲一, 岸田欣増, "光ファイバにおける漏れ光を考慮した誘導ブリルアン散乱の摂動解析", 信学技報 OFT, Oct. 2004 (本研究会)
- [5] T.Horiguchi, T.Kurahima, and M.tateda, "Nondestructive measurement of optical-fiber tensile strain distribution based on Brillouin spectroscopy," Trans. IEICE Japan, vol.J73-B_I, no.2, pp.144-152, 1990