

PPP-BOTDA 測定技術を用いた 2cm 分解能ブリルアン分布計測の実現

李 哲賢[†], 西口 憲一[†], 宮武 美由紀[†], 牧田 篤[†], 横山 光徳[†], 岸田 欣増[†], 水谷 忠均[‡], 武田 展雄[‡]

[†]ニューブレクス (株) 〒650-0023 兵庫県神戸市中央区栄町通 1-1-24

[‡]東京大学大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻
〒277-8561 柏市柏の葉 5-1-5 東大新領域基盤棟メールボックス 302
E-mail: li-z@neubrex.jp

あらまし PPP-BOTDA (Pulse-PrePump Brillouin Optical Time Domain Analysis) 測定技術を用いた 10cm 分解能ブリルアン分布計測の実現についてはすでに発表されており, その 10cm 空間分解能, $\pm 25 \mu\epsilon$ ひずみ測定精度の性能は, 既に様々な分野で活用されている. 本論文では, まず PPP-BOTDA により実現可能な空間分解能について理論検討の結果を述べ, 次に理論検討を実現するために PPP-BOTDA 測定システムをどのように構成すべきかについて述べる. 最後に試作したラックタイプの PPP-BOTDA を用いて達成した 2cm 空間分解能, $\pm 25 \mu\epsilon$ ひずみ測定精度の測定結果を報告し, PPP-BOTDA がセンチメートルオーダー空間分解能に適していることを示す.

キーワード パルス・プリポンプ方式, PPP-BOTDA, ブリルアン分布計測, センチメートルオーダー空間分解能

PPP-BOTDA method to achieve 2cm spatial resolution in Brillouin distributed measuring technique

LI Che-Hsien[†], Kenichi NISHIGUCHI[†], Miyuki MIYATAKE[†], Atushi MAKITA[†],
Mitsunori YOKOYAMA[†], Kinzo KISHITA[†], Tadahito MIZUTANI[‡], Nobuo TAKEDA[‡]

[†]Neubrex Co., Ltd Sakaemachi-Dori 1-1-24, Chuou-ku, Kobe, Hyougo 650-0023 Japan

[‡]Graduate School of Frontier Sciences The University of Tokyo
5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba 277-8561, JAPAN

E-mail: li-z@neubrex.jp

Abstract PPP-BOTDA (Pulse-PrePump Brillouin Optical Time Domain Analysis) method was published in previous work and the possibility of access with 10cm spatial resolution was illustrated. The system has been applied in various fields using this 10cm spatial resolution and $\pm 25 \mu\epsilon$ strain measuring precision. This paper reports the result of the theoretical study for the feasible spatial resolution, and the PPP-BOTDA measuring system to realize the theoretical study. This paper also reports the test results of 2cm spatial resolution and $\pm 25 \mu\epsilon$ strain measuring precision using a prototype of rack-type PPP-BOTDA measuring system thus illustrate that the PPP-BOTDA system is appropriate for the cm-order spatial resolution.

Keyword PPP-BOTDA, Pulse-PrePump Method, Brillouin, Highly spatial resolution

1. はじめに

これまでに著者らにより, センチメートルオーダーの高空間分解能を有するブリルアン分布計測を実現する方法 [1], [2] が提案され, その成果が発表されてきた [3]. その後, 10cm 空間分解能, 測定精度 $\pm 25 \mu\epsilon$ の PPP-BOTDA (NEUBRESCOPE NBX-6000: ニューブレクス(株)社製) が市販され, 様々な計測分野 (発電所の配管の減肉監視, 航空機の疲労監視など) に活用されている. しかし, パルス・プリポンプ方式を用いた高分解能ブリルアン計測の空間分解能の限界をどこまで伸ばせるかについては, 議論されてこなかった.

本報告では, まずパルス・プリポンプ方式を用いた高分解能ブリルアン計測の空間分解能について, シミュレーションを行い, その結果からパルス・プリポンプ方式の限界について解説する. 次に, そのシミュレーションの結果から得られたパラメータを用いて実現可能な PPP-BOTDA のシステムを構築し, その構成について述べる. 最後に, 開発したラックタイプの PPP-BOTDA (NEUBRESCOPE NBX-6020) を用いて 2cm 分解能, $\pm 25 \mu\epsilon$ 歪測定精度が達成されたことを報告する.

2. PPP-BOTDA の原理

2.1. 計測の基礎理論

ポンプ光に階段状のパルス光を用いることが PPP-BOTDA の特徴である. その計測概念を図 1 に示す.

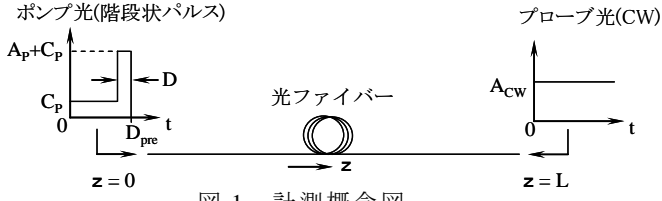


図 1 計測概念図

パルス・プリポンプ光として用いる光を

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

と表す．ここで A_p と C_p はそれぞれポンプ光とプリポンプ光の振幅を表す． $A_p(t)$ の消光比は式(2)で表される．

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

光ファイバの誘導散乱光の振幅は， Brillouin 誘導散乱方程式系を摂動法で解くことにより

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

と表される[2]．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， $H(t, \Omega)$ は後述する時間と周波数の関数である．これらの詳細については文献[2]を参照されたい．誘導 Brillouin 散乱 (Stimulated Brillouin Scattering: SBS) 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される．

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

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

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

(5)

ただし，

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

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

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

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

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

であり， L は光ファイバの全長を， $\Omega_B(z)$ は Brillouin 散乱の中心周波数を表す．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式(8)で関係付けられる．

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

式(6.1)と式(6.2)では，ポンプ光からプローブ光へのエネルギーの転移が局所的 (D) に行われ，局所的な位置情報が保持される．一方，式(6.3)と式(6.4)ではエネルギーの転移が長時間 (D_{pre}) にわたって行われ，位置情報が拡散されてしまう．

2.2. シミュレーションによる検証

今回使用した階段状のパルス光として， D_{pre} の部分を最適に設定したパルス ($D_{pre} \gg D$) を用いることにより， H_2 を強調すると同時に H_4 を抑えて，局所的な情報が拡散されないようにすることができる．前節で述べた PPP-BOTDA の限界を検証するために，図2に示すような測定系を用いてシミュレーションを行った．ポンプ光として，パルス幅 $D = 0.1\text{ns}$ ， 0.2ns ， 0.5ns の短いパルスを用いた．プリ・ポンプパルスに相当する長いパルスは $D_{pre} = 13\text{ns}$ とし，それらのレベル比 R_p は $35\text{dB} \sim 50\text{dB}$ とした．被測定ファイバとして，周波数シフト量が 55MHz である長さ 1cm ， 2cm ， 5cm のファイバを距離 1.5m ， 3m ， 4.5m の位置に配置した．

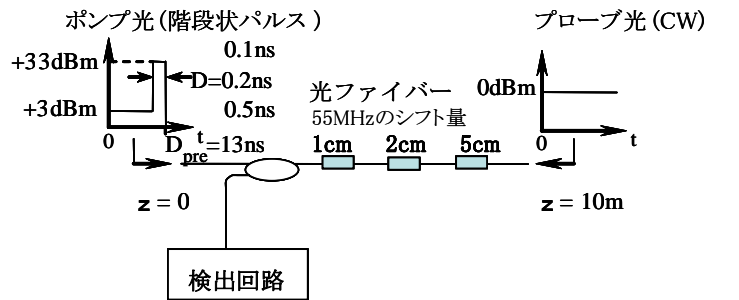
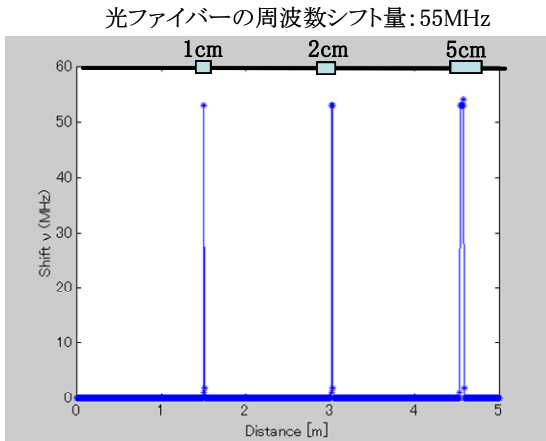


図 2 シミュレーションに用いた測定系

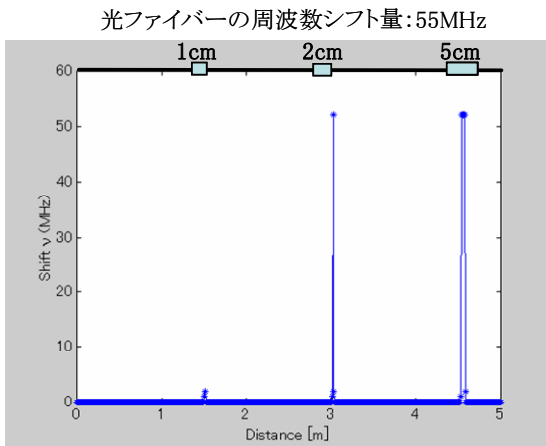
式(4)を用いてシミュレーションを行った結果を図3に示す．シミュレーションでは， 1.0cm ステップおよ

び 0.1MHz ステップで Brillouin・ゲイン・スペクトルを計算し、その最大レベルの周波数を Shift ν とした。

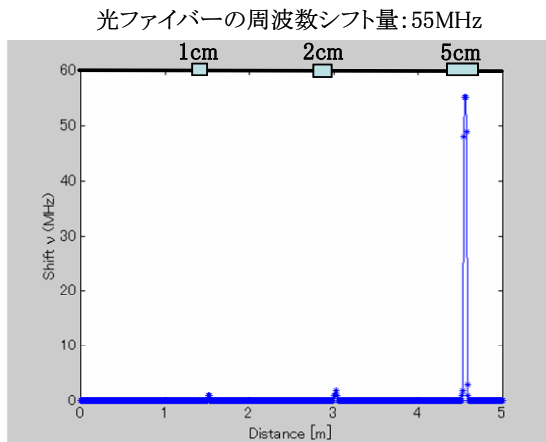
図 3(a) は 0.1ns のパルスを用いて 1cm のファイバを識別できる条件、(b) は 0.2ns のパルスを用いて 2cm のファイバを識別できる条件、(c) は 0.5ns のパルスを用いて 5cm のファイバを識別できる条件、(c) は 0.5ns のパルスを



(a) 1cm 分解能のシミュレーション結果



(b) 2cm 分解能のシミュレーション結果



(c) 5cm 分解能のシミュレーション結果

図 3 シミュレーションの結果

用いて 5cm のファイバが識別できる条件でのシミュレーション結果である。これらのシミュレーション条件は、(a) : ポンプパルス幅 $D=0.1\text{ns}$, パルス・プリポンプ幅 $D_{pre}=13\text{ns}$, 消光比 $R_p=50\text{dB}$, (b) : $D=0.2\text{ns}$, $D_{pre}=13\text{ns}$, $R_p=40\text{dB}$, (c) : $D=0.5\text{ns}$, $D_{pre}=13\text{ns}$, $R_p=35\text{dB}$ である。これらの条件を満たす階段状のパルスをファイバに入射すると、まずパルス・プリポンプ光の通過によりフォノンが励起される。次に、この十分にフォノンが励起されたファイバをポンプパルスが通過する際に、ポンプパルスの幅に相当する空間において、歪量に見合う Brillouin 周波数シフトが生じる。ポンプパルスの幅 0.1ns~0.5ns は距離に換算すると 1cm~5cm に相当する。パルス・プリポンプ光による狭い幅の Brillouin・ゲイン・スペクトラムが得られ、その幅はおよそ 80MHz 程度となるので、高い歪み測定精度を達成することができる。このシミュレーション結果からわかるように、パルス・プリポンプ方式を用いた高分解能 Brillouin 計測の空間分解能は 1cm にまで伸ばすことが可能である。

2.3. ダイナミック・レンジの検証

式(4)を用いて、一段の LN 強度変調器が達成できる消光比の条件下で、パルス・プリポンプにより発生する誘導 Brillouin 散乱光レベル $P-P_b(z)$ を見積もった。その結果、

$D=0.1\text{ns}@+33\text{dBm}$, $D_{pre}=13\text{ns}@+4\text{dBm}$ の $P-P_b(0)=-34\text{dBm}$,
 $D=0.2\text{ns}@+33\text{dBm}$, $D_{pre}=13\text{ns}@+2\text{dBm}$ の $P-P_b(0)=-30\text{dBm}$,
 $D=0.5\text{ns}@+33\text{dBm}$, $D_{pre}=13\text{ns}@+0\text{dBm}$ の $P-P_b(0)=-26\text{dBm}$,
 を得た。計算では、Brillouin 利得係数 $g=2.5 \times 10^{-11}(\text{m} \cdot \text{W})$, ファイバ有効断面積 $A=1 \times 10^{-10}(\text{m}^2)$ を用いている。

ダイナミック・レンジ (DR) は式(9)により計算できる。

$$DR = \{P - P_b(z) - P_D - L_C - PC_{AV} + SNR_{AV} / 2 - SNR_{\delta\nu}\} / 2 \quad (9)$$

$P-P_b(z)$: 階段状のパルス光の SBS

P_D : 受光系の SNR=1 の最小受光レベル

L_C : 受光側の結合損失 (1dB)

PC_{AV} : 偏波スクランブラによる平均損失 (3dB)

SNR_{AV} : 平均加算による SNR の改善率 (21dB: 2^{14})

$SNR_{\delta\nu}$: 曲線近似に必要な SNR (3dB)

現在の技術レベルでは、1cm, 2cm, 5cm 分解能の最小受光レベル (P_D) は、実測値として、それぞれ -27dBm (BW:10GHz), -30dBm (BW:5GHz), -34dBm (BW:2GHz) であるから、1cm, 2cm, 5cm 分解能での DR はそれぞれおよそ -1.75dB, +1.75dB, +6.0dB になる。これらの計

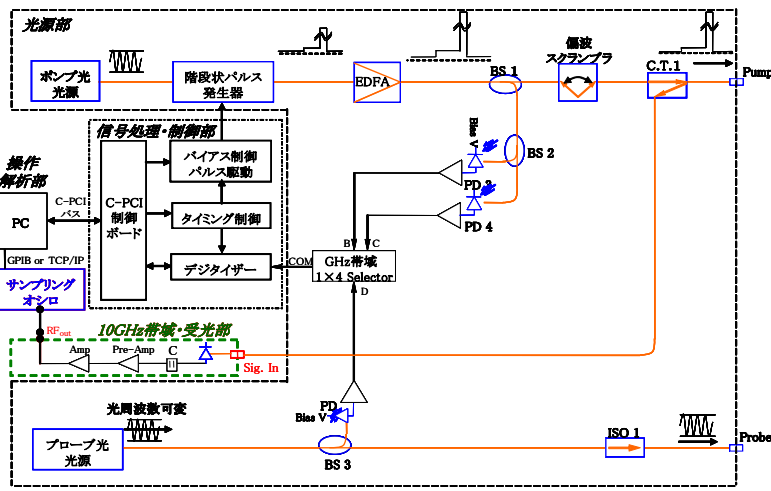


図4 測定機の基本構成図



図5 試作した装置の構成

算結果から、現在の技術レベルでは、パルス・プリポンプ方式を用いた高分解能ブリルアン計測により実現できる空間分解能は2cmであることが判明した。

3. 測定機の基本構成

図4に測定機の基本構成図を示す。開発の効率を向上させるために、測定機全体を操作・解析部(PC) + 信号処理・制御部・光源部(本体) + 高速サンプリングオシロスコープ + 広帯域・受光部に分割した。PCと本体との間をC-PCIバスで接続し、C-PCI制御ボードを通して光源部を制御した。PCと高速サンプリングオシロスコープとの間はTCP/IPで接続し、広帯域・受光部から得た信号を高速サンプリングし、PC側に転送した。操作・解析部は市販のPCを使用するので、いつでも更新が可能である。CPUの処理速度がアップすれば、解析速度の向上が期待できる。本体にCPUを持たせない設計は、将来の本体ハードウェアのバージョンアップをも容易にする。また、今回は2cm分解能を達成するために、サンプリング速度10GS/sの高速サンプリングオシロスコープを採用し、1cm間隔の信号処理を行った。階段状のパルス光の成形は、高速パルス発生器から発生した短いパルスでLN強度変調器を駆動し、 $D=0.2\text{ns}$ と 0.5ns のポンプパルス光を生成し、さらに直列したLN強度変調器でパルス・プリポンプ光を生成することにより行った。

4. 実験の構成

図5に今回試作した装置を示す。図6には試作機の検証に用いた被測定ファイバの構成を示す。被測定ファイバの全長は約75mでブリルアン周波数シフトの異

なる2種類の光ファイバで構成されている。図6ではファイバAを2重の巻線、ファイバBを1重の巻線に表示した。ファイバAとファイバBとのブリルアン周波数シフト差は51.6MHzである。単位歪当りのブリルアンシフト量は $0.0493\text{MHz}/\mu\epsilon$ であるから、ファイバBの歪量はファイバAより約1200 $\mu\epsilon$ 高くなる。尚、異なる光ファイバ間は融着により接続を行った。

測定条件は、5cm分解能時に、 $D=0.5\text{ns}@+35\text{dBm}$ 、 $D_{pre}=13\text{ns}@+6\text{dBm}$ 、 $CW=0\text{dBm}$ 、掃引光周波数のステップ=5MHz、データのサンプリングステップ=1cmである。2cm分解能時は、 $D=0.2\text{ns}@+35\text{dBm}$ 、 $D_{pre}=13\text{ns}@+4\text{dBm}$ 、 $CW=0\text{dBm}$ 、掃引光周波数のステップ=5MHz、データのサンプリングステップ=1cmとした。

Test Under Fiber

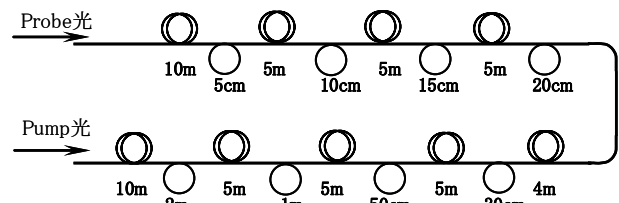


図6 被測定ファイバの構成

5. 実験結果と検討

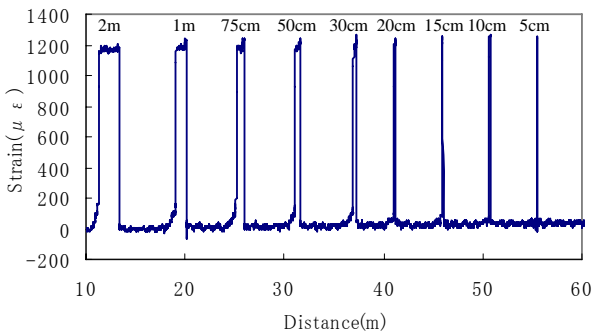
図5の試作装置を用いて図6の被測定ファイバを測定した結果を図7に示す。5cm分解能で測定したBGSの最大レベルの周波数を歪分布に換算した。(a)は全体の波形、(b)は長さ10cmのファイバB周辺、(c)は長さ5cmのファイバB周辺の拡大図である。(c)において、2点のデータが取れたことから、5cmの分解能が達成できたと考えられる。

図8には、2cm分解能での試験における図7と同様

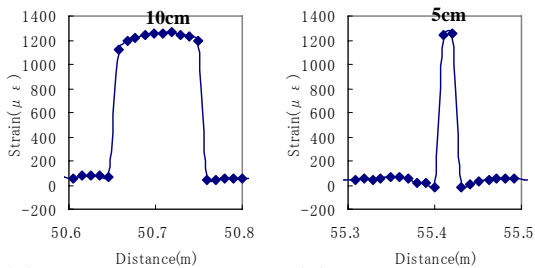
の結果を示した。(c)において、5点のデータが取れたことから、2cmの分解能が達成できたとと言える。

図9は、5cm分解能の試験において、光周波数をファイバBのブリルアン周波数シフトに合わせた時の誘導ブリルアン散乱(SBS)波形である。(a)は距離30m~60mの位置での波形、(b)は長さ10cmのファイバB周辺の拡大図、(c)は長さ5cmのファイバB周辺の拡大図である。長さ5cmのファイバBのSBS変化成分が取得できていることがわかる。

図10には、2cm分解能試験における図9と同様の結

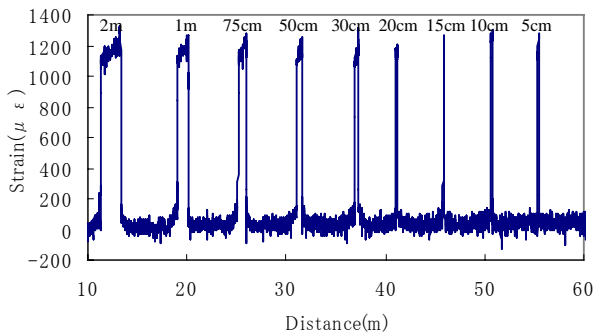


(a) 全体波形

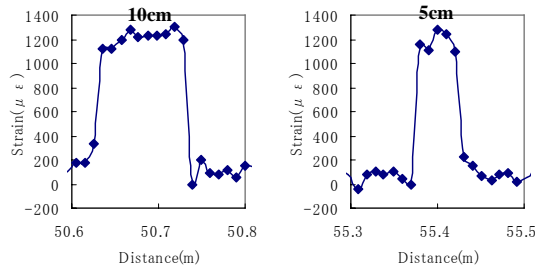


(b) 10cmファイバ周辺 (c) 5cmファイバ周辺

図7 5cm分解能での測定結果



(a) 全体波形

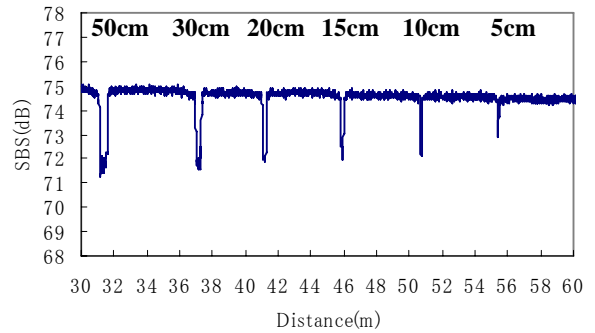


(b) 10cmファイバ周辺 (c) 5cmファイバ周辺

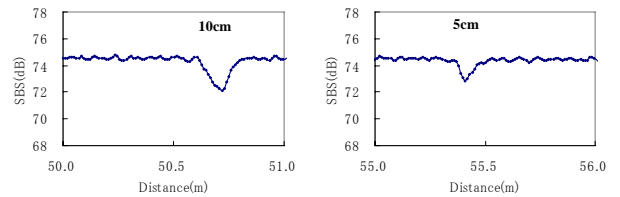
図8 2cm分解能での測定結果

果を示した。長さ5cmのファイバBのSBS変化は図9(c)に示した5cm分解能のSBS波形に比べて、より急峻になっていることがわかる。

図11は長さ5cmのファイバB近傍のBGS(Brillouin Gain Spectrum)波形である。(a)~(g)は長さ5cmのファイバBの中心位置から、それぞれ、-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3cmずれた位置の波形を示している、図11のBGS波形の中心周波数シフトの状況(BGSの最大レベルを用いて±5点の周波数で中心周波数を近似曲線によって割り出す。)からわかるように、5cm分解能の場合、長さ5cmのファイバBを測定した結果、2点

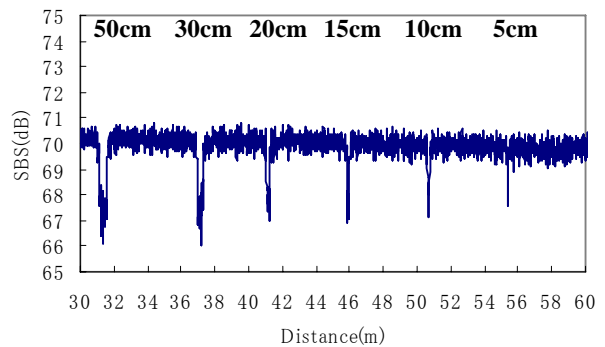


(a) 距離30m~60mのSBS波形

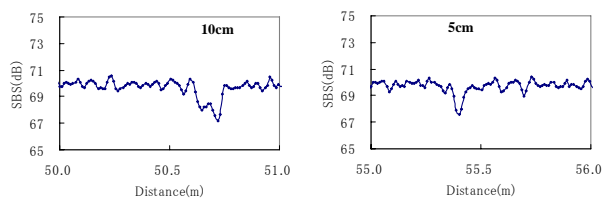


(b) 10cmファイバ周辺 (c) 5cmファイバ周辺

図9 5cm分解能のSBS波形



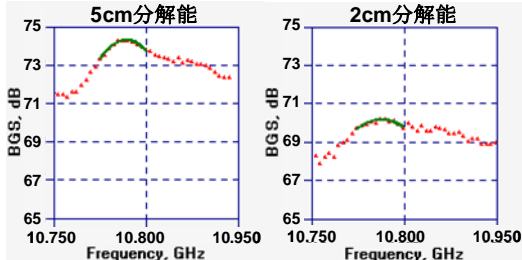
(a) 距離30m~60mのSBS波形



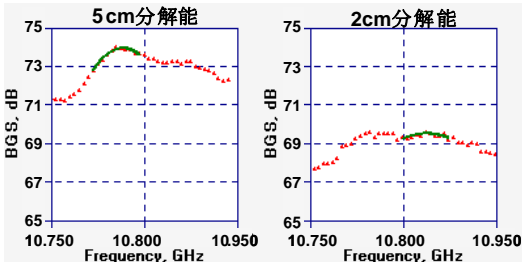
(b) 10cmファイバ周辺 (c) 5cmファイバ周辺

図10 2cm分解能のSBS波形

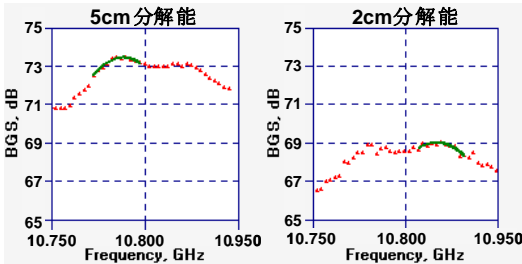
程度（中心位置から-1cmおよび-2cmの位置）で周波数がシフトしたBGS波形が得られた。2cm分解能の場合、5cmファイバを測定した結果、5点程度（中心位置から-2cm~2cmの位置）で周波数がシフトしたBGS波形が得られた。この結果からも、2cm分解能が達成されたことが証明される。



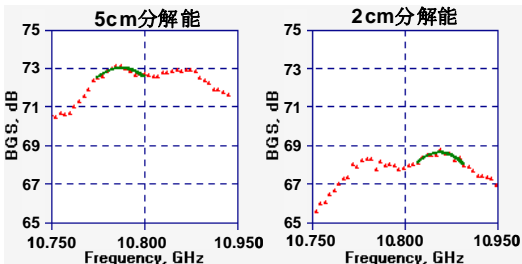
(a) 5cmファイバの中心から-3cmずれた位置



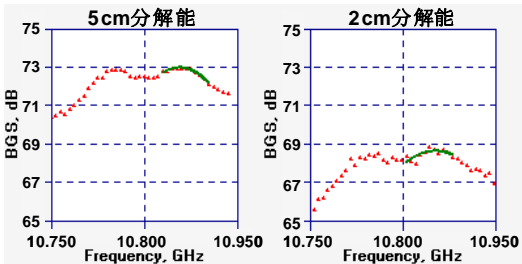
(b) 5cmファイバの中心から-2cmずれた位置



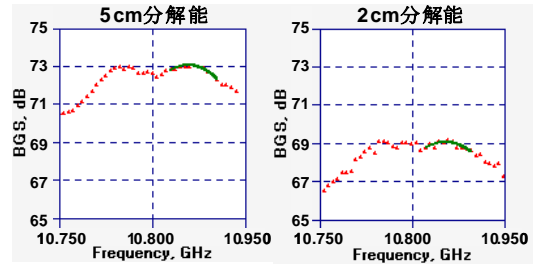
(c) 5cmファイバの中心から-1cmずれた位置



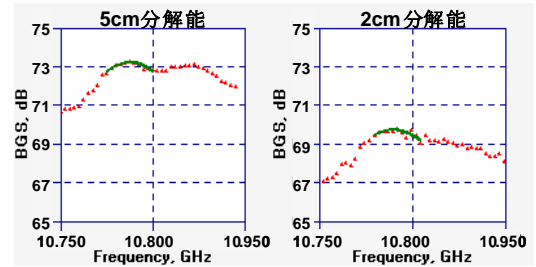
(d) 5cmファイバの中心位置



(e) 5cmファイバの中心から+1cmずれた位置



(f) 5cmファイバの中心から+2cmずれた位置



(g) 5cmファイバの中心から+3cmずれた位置

図 11 2cm, 5cm 分解能の BGS 波形

6. まとめ

パルス・プリポンプ方式を用いた高分解能 Brillouin 計測の空間分解能についてシミュレーションを行った結果、空間分解能 1cm まで良好なシミュレーション結果が得られた。しかし、ダイナミック・レンジを検証したところ、現状の技術レベルでは、受光系の最小受光レベルの制限から、パルス・プリポンプ方式を用いた高分解能 Brillouin 計測の空間分解能が 2cm であることが判明した。シミュレーションにより得られたパラメータを用いて、2cm 分解能の PPP-BOTDA (NEUBREScope NBX-6020) を設計・開発し、その試作機を用いて、2cm 空間分解能、 $\pm 25 \mu\epsilon$ 測定精度を実現した。2cm 空間分解能でのダイナミック・レンジを考慮すれば、100m を超える計測距離が達成できると期待される。

謝辞

本研究を進めるうえで有益な助言を頂いた山内良昭博士に深謝致します。

文献

- [1] 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 Brillouin 散乱の摂動解析”, 信学技報, 47, OFT, 9, Oct. 2004
- [2] 岸田欣増, 李哲賢, 林縄繻, 西口憲一, “パルス・プリポンプ方式を用いた高分解能 Brillouin 計測の理論検討”, 信学技報, 47, OFT, 15, Oct. 2004
- [3] 李哲賢, 津田 勉, 岸田欣増, “PPP-BOTDA 測定技術を用いた 10cm 分解能 Brillouin 分布計測の実現”, 信学技報, OFT2005-16 (2005-8)