

PPP-BOTDA を用いた高分解能(10cm)かつ高速(10Hz)分布計測の実現

李 哲賢¹, 津田 勉¹, 澤 貴弘¹, 牧田 篤¹, 高野 宏和¹, 岸田 欣増¹, 吳 智深², 武田 展雄³, 水口 周³

¹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

²茨城大学工学部 都市システム工学科 〒316-8511 日立市中成沢町 4-12-1

³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

E-mail: li-z@neubrex.jp

あらまし PPP-BOTDA (Pulse-Pre-Pump Brillouin Optical Time Domain Analysis) 測定技術を用いた 2cm 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しており, 実際に 10cm 空間分解能の製品を用いて様々な分野で活用されている. しかし, 今までは静的なひずみ測定にしか応用されていなかった. 本論文ではまず, PPP-BOTDA により実現可能な測定速度について検討し, 次に検討結果を実現するために 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, 開発した NEUBREScope NBX-6040A を用いて達成した 10cm 空間分解能, 50 μ ϵ ひずみ測定精度 (標準偏差 σ), 10Hz 測定速度の分布測定 (1,000 データ) を報告し, PPP-BOTDA (NEUBREScope NBX-6040A) が動的なひずみ測定も適していることを示した.

キーワード パルス・プリポンプ方法, PPP-BOTDA, ブリルアン分布計測, センチオーダ空間分解能, 動的なひずみ

PPP-BOTDA method to achieve 10cm spatial resolution and 10Hz measuring speed in distributed sensing

Che-Hsien LI¹, Tsutomu TSUDA¹, Takahiro SAWA¹, Atsushi MAKITA¹, Hirokazu TAKANO¹, Kinzo KISHIDA¹, Zhishen WU², Nobuo TAKEDA³, Shu MINAKUCHI³

¹Neubrex Co., Ltd. Sakaemachi-Dori 1-1-24, Chuo-Ku, Kobe, Hyogo 650-0023 Japan

²IBARAKI UNIVERSITY DEPARTMENT OF URABAN & CIVIL ENGINEERING
Nakanarusawa-cho 4-12-1, Hitachi 316-8511, Japan

³Graduate 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 The Pulse-Pre-Pump Brillouin Optical Time Domain Analysis (PPP-BOTDA) method is capable of achieving 2cm spatial resolution. Its fundamentals were already published in our previous papers. The PPP-BOTDA based system has been successfully used in various industrial applications. However, as it was previously pointed out, it was so far able to measure the static or quasi-static strain, only. In this paper, the study on the PPP-BOTDA maximum feasible measurement speed is presented. Moreover, the actual measurements employing developed NEUBREScope NBX-6040A system (1,000 data points, spatial resolution of 10 cm and 50 μ ϵ strain uncertainty) at 10 Hz frequency (speed) are included. The results clearly demonstrate that PPP-BOTDA based distributed sensing system (NEUBREScope NBX-6040A) is suitable for the dynamic strain measurement.

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

1. はじめに

BOTDA, BOTDR の測定技術は測定時間の制限で動的な (1Hz 以上) ひずみ変化に対応できず, さらにセンチオーダの空間分解能が達成できない理由で高空間分解能と動的なひずみ変化を求める業界にあまり注目されていなかった. しかし, 同じくブリルアン散乱を利用した BOTDA の測定技術は 5cm 空間分解能, 25 μ ϵ 測定精度 (σ), 10Hz の測定速度が報告されている [1].

BOTDA, BOTDR の測定時間が短縮できない理由として三つあげることができる. (1) SN 比が足りないのので, 繰り返し測定で 10^3 以上の平均加算をしなければならない. (2) 短期間内の偏波による信号の振幅揺らぎを改善しなければならない. (3) 時間領域 (1,000 データ以上) と周波数領域 (ひずみ量の測定範囲内) との処理を同時に行わなければならない. この三つの壁が

BOTDA, BOTDR の高速測定を阻害したと考えられる。

現在, 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 [2], [3] が発表され, 10cm 空間分解能, $7.5 \mu \epsilon$ 測定精度 (標準偏差 σ) の PPP-BOTDA (NEUBREScope NBX-6040: ニュープレクス株社製) が市販されている. 今までの技術では空間分解能と測定精度の壁を多少克服したが, 高速測定 (1Hz 以上) の壁は依然立ちはだかっている.

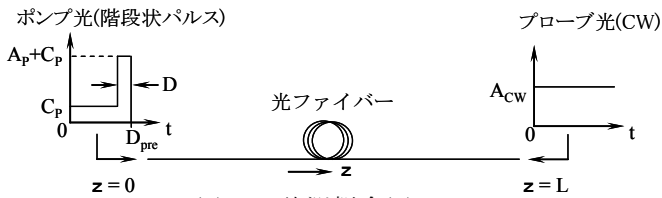
本報告では, 測定速度を阻害する三つの壁に対する打開策を検討し, その検討結果から得られた対策を用いて実現可能な PPP-BOTDA のシステムを構築し, その構成について述べる. 最後に, 開発した PPP-BOTDA (NEUBREScope NBX-6040A) を使って, 10cm 空間分解能, $50 \mu \epsilon$ 測定精度 (標準偏差 σ), 10Hz 測定速度の分布測定 (1,000 データ) が達成されたことを報告する.

2. PPP-BOTDA の特徴

2.1. 高い SN 比

従来の BOTDA は光パルスを被測定光ファイバに入射し, ある測定点についての信号は時間軸上でサンプリングによって得られる. 光パルスの幅は空間分解能を決め, 光パルスのデューティは測定距離の範囲を決める. 高い分解能を得るために光パルス幅を狭くしなければならないので, 得られる信号が弱く, 長い時間で平均をしなければ十分な SN 比が得られない. さらに最大のブリルアン・ゲインを持った周波数シフトを求めするために光周波数を掃引しなければならないので, あるひずみ波形が得られるまでの平均的な時間は 2 分ないしは 3 分かかる.

本研究で進めている PPP-BOTDA によれば, 各測定点に対して, 常にプリポンプ光が到来しており, 高い空間分解能 (10cm) の場合でも高い SN 比が得られる. その PPP-BOTDA の計測概念図を図 1 に示す.



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 (2) 式で表す.

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

光ファイバの誘導散乱光の振幅は, ブリルアン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. 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. これらの意味を文献 [4] に示した. 誘導ブリルアン散乱 (Stimulated Brillouin Scattering: SBS) の利得は散乱がない場合のプロープ光のパワーからの増加分として次のように表される.

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

(1) 式のポンプ光を用いた時, (4) 式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.

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

ただし,

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

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

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

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

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

であり, L は光ファイバの長さを, $\Omega_B(z)$ 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.

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

(6.1) 式から (6.4) 式によってポンプ光からプロープ光へのエネルギーの転移に関して (6.1) 式と (6.2) 式では局所的 (D) に行われ, 局所的な位置情報が保持されるようになる. 一方, (6.3) 式と (6.4) 式ではエネルギー

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。

(6.2)式は PPP-BOTDA の主要信号であり、その式からわかるように適切な A_p と C_p と D_{pre} を使えば、PPP-BOTDA 方式は従来の BOTDA 方式より SN 比が 6~12 dB 向上することが可能であり、平均加算時間を換算すると 4~8 倍短縮することが可能である。

2.2. 加算回数による測定結果のばらつき

今回、市販している PPP-BOTDA (NBX-6040) を使用して図 2 に示すような測定系を用いて加算回数による測定結果のばらつきについて評価を行った。

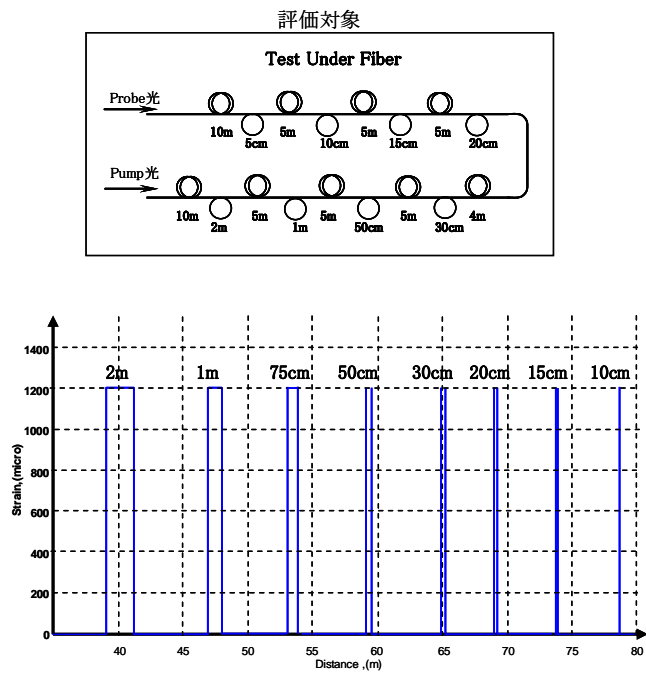


図 2 ひずみ測定精度を検証する対象

図 2 の測定対象はひずみ量 $1200 \mu \epsilon$ を持った 2m~10cm のファイバを 5m ないしは 4m の間隔に配置する。

評価条件 (10cm 分解能) では、各々の加算回数で各 5 回の繰り返し測定を行い、そのばらつきの標準偏差を図 3 に示した。加算回数 2^8 , 2^{12} , 2^{16} の測定結果は図 4 (a), (b), (c) で示した。

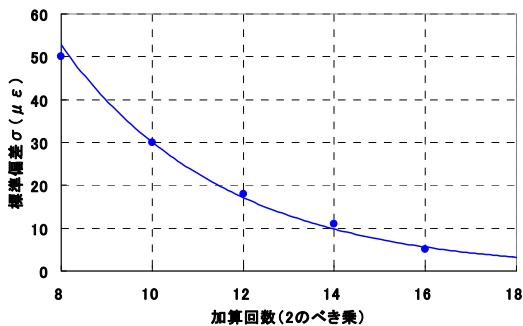
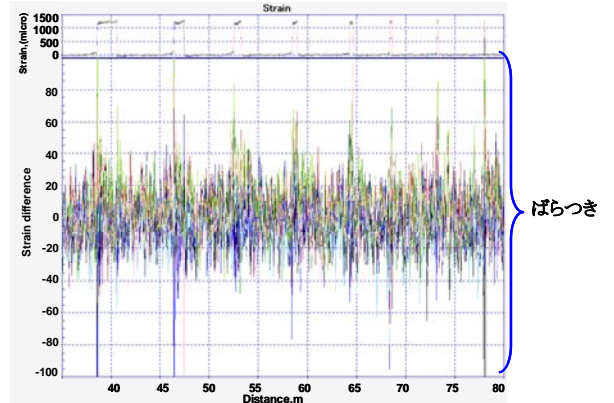
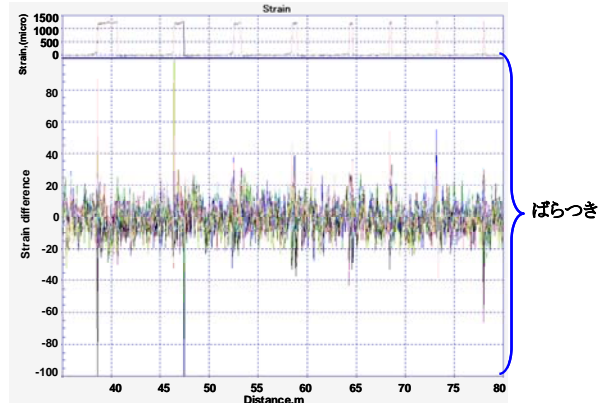


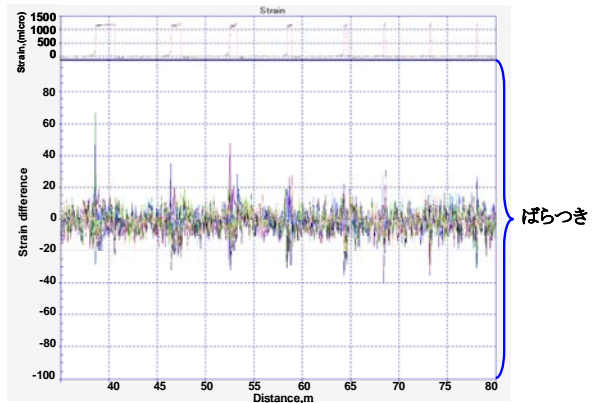
図 3 加算回数 V.S. ひずみ測定結果の偏差



(a) 加算回数 2^8 の測定結果 (5 回の比較)



(b) 加算回数 2^{12} の測定結果 (5 回の比較)



(c) 加算回数 2^{16} の測定結果 (5 回の比較)

図 4 加算回数によるひずみ測定結果のばらつき

図 3 と図 4 の評価結果からわかるように、PPP-BOTDA の方式を使えば、10cm 空間分解能、加算回数 2^8 においても $50 \mu \epsilon$ 測定精度 (σ) が得られる。

2.3. 実現可能な測定速度への検証

分布データの測定はある光パルスを繰り返してに被測定光ファイバへ入射し、すべての測定点についての信号は時間上でサンプリング (アナログ・デジタル変換) によって得られる。得られる信号は弱いので、繰り返してに加算平均を行い、SN 比を向上させなければなら

らない。その光パルスの繰り返し周期とサンプリング時間との繰り返し加算平均時間は、測定速度を制限している。一般に下記の式で処理時間を表す。

$$T = ((T_p \times (T_s / T_r) + T_a)) \times N + T_d \quad (9)$$

- T_p : 光パルスの繰り返し周期
- T_s : データのサンプリング間隔
- T_r : アナログ・デジタルのサンプリング速度
- T_a : 加算平均の余分処理時間
- T_d : データの転送時間
- N : 加算平均回数

たとえば、光パルスの繰り返し周期(T_p)=2.5 μ s, データのサンプリング間隔(T_s)=500ps(5cm), サンプリング速度(T_r)=500ps/S, 加算平均の余分処理時間(T_a)=1.5 μ s, 加算平均回数(N)=256 回であれば、処理時間は1.024msで5,000 データのサンプリングと256回の加算平均の処理ができる。最大ブリルアン・ゲイン周波数シフトを求めるためにある光周波数範囲内に掃引しなければならない。たとえば、 $\pm 1,500 \mu$ ϵ の測定範囲であれば光周波数掃引範囲を ± 100 MHz に設計すべきである。掃引ステップを5MHzにすると、41回の繰り返し測定が必要である。つまり、PPP-BOTDA の測定時間(T_t)は下記の式で表すことができる。

$$T_t = (((T_p \times (T_s / T_r) + T_a) \times N + T_d) \times F_n) + T_f \quad (10)$$

- F_n : 光周波数の掃引回数
- T_f : 各BGSから各周波数シフトの計算時間

式(9)と式(10)から上記の条件で、 $T_t = 1.024\text{ms} \times 41 + T_f$ になる。 T_d と T_f は短い時間に抑え、測定時間(T_t)は100ms(10Hz)以内に達成することができると考えた。

3. 測定器の基本構成

図5は測定器の基本構成図であり、パソコンの中にハード加算機能を持った高速デジタルサイザを搭載して2GS/sのサンプリング速度を提供しているので、加算平均の余分処理時間は1.5 μ sしかない。NBX-6040Aの中に高速偏波スクランブラーを実装し、偏波スクランブラーの速度は100 μ sで光源のDOPを5%以下にすることが出来る。ソフト側も並列処理(制御とデータ転送)を工夫し、 T_d を最小値に抑えることができ、さらに中心周波数の検出アルゴリズムも最適化した。



図5 測定器の基本構成

表1はNBX-6040Aの性能をまとめた内容である。

表1 NBX-6040Aの性能一覧

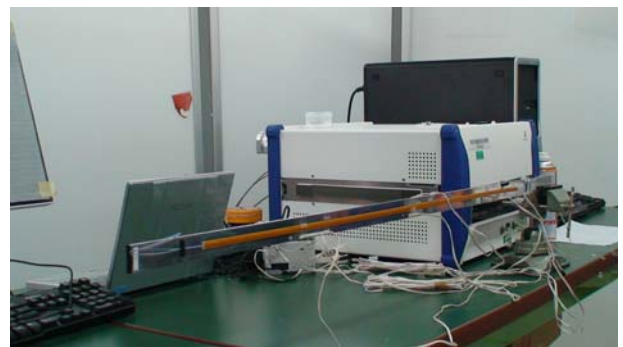
測定条件: 空間分解能:10cm, サンプリング間隔:5cm, 歪みの測定範囲: $\pm 1500 \mu$ ϵ

	精度(μ ϵ)			再現性(μ ϵ)			測定時間(sec)		
	2 ⁸ 回	2 ⁹ 回	2 ¹⁰ 回	2 ⁸ 回	2 ⁹ 回	2 ¹⁰ 回	2 ⁸ 回	2 ⁹ 回	2 ¹⁰ 回
50mレンジ	50	35	25	50	35	25	0.1	0.2	0.4
250mレンジ	50	35	25	50	35	25	0.15	0.3	0.6
500mレンジ	50	35	25	50	35	25	0.25	0.5	1.0

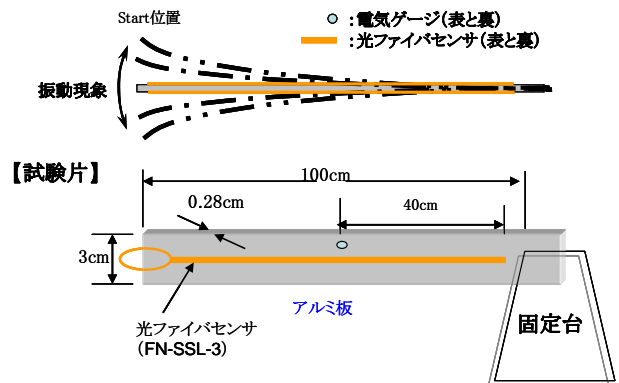
表1からわかるようにNBX-6040Aは50mの距離レンジ, 5cmのサンプリング間隔, $\pm 1,500 \mu$ ϵ のひずみの測定範囲, 1,000ポイントのひずみデータでは0.1s(10Hz)の測定間隔で取得することができる。500mの距離レンジ, 5cmのサンプリング, $\pm 1,500 \mu$ ϵ のひずみの測定範囲, 10,000ポイントのひずみデータでは0.25s(4Hz)の測定間隔で取得することができる。

4. 実験の構成

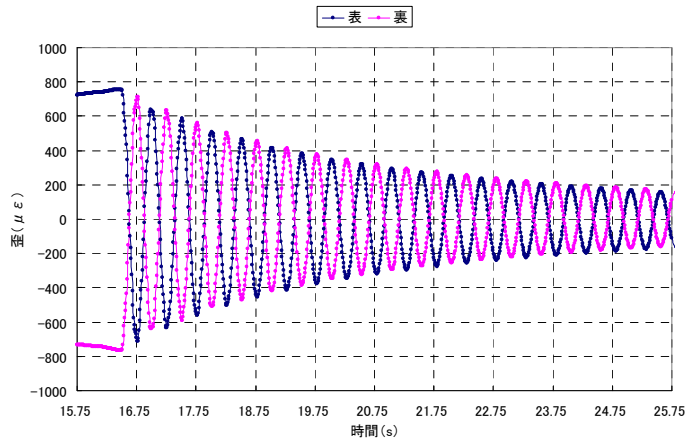
図6(a)は今回の実験構成であり、光ファイバセンサはフジクラ社製のFN-SSL-3を使い、試験片の両面に貼り付けた。比較するために電気ゲージを試験片の両面に取り付けた。図6(b)のように試験片の遠端を固定すると約2Hzで振動をさせることができ、電気ゲージで測定した結果は図6(c)に示した。



(a) 実験構成



(b) 試験片の構成



(c) 試験片の振動現象

図6 実験の構成

5. 実験結果と検討

図7は、図6(a)の試作装置を用いて試験片の静止状態を測定し、BGSの最大レベルの周波数を表現した分布波形である。0.972mから1.586mまでは裏面に貼り付けの光ファイバセンサであり、2.456mから3.070mまでは表面に貼り付けの光ファイバセンサである。

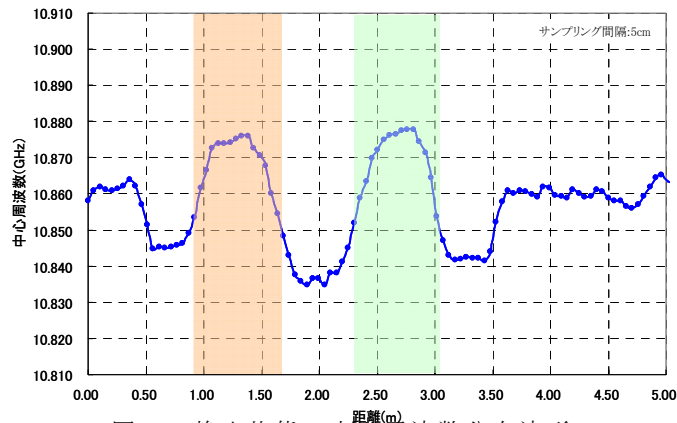


図7 静止状態の中心周波数分布波形

測定条件は、距離レンジ50m、空間分解能10cm、サンプリング間隔5cm、周波数の掃引範囲±100MHzで測定を行い、一回の測定時間は約100msになった。図8は振動前の測定結果、振動させてから6回の測定結果、静止後の測定結果を表示した波形である。距離のサンプリング点の中心周波数は振動時間とともに変化していることが観察できた。つまり、距離と中心周波数とのデータは時間と共にサンプリングされて3次元のデータ構造になる。図9(a)は、その3次元構造のデータから裏面に貼り付けの光ファイバセンサ(0.972m~1.586m)の測定結果を抽出した波形である。図8(b)は、表面に貼り付けの光ファイバセンサ(2.456m~3.070m)の測定結果を抽出した波形である。

図10は電気ゲージの位置と相当する場所のデータ

(表面(2.763m)、裏面(1.279m))を抽出し、時系列に並び表示をした波形であり、その結果と図6(c)と比較すると、試験片の振動周期は約2Hzで、ひずみの大きさは±600 $\mu\epsilon$ から指数関数で減衰していったことが観察できた。事前に光ファイバセンサを校正し、そのひずみ係数は10MHz/200 $\mu\epsilon$ であることが判明した。

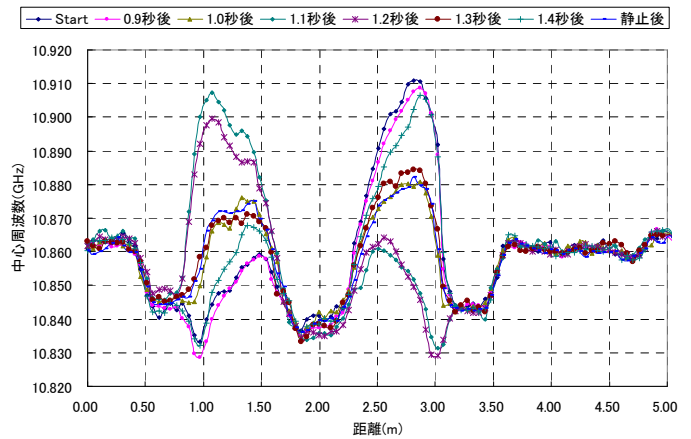
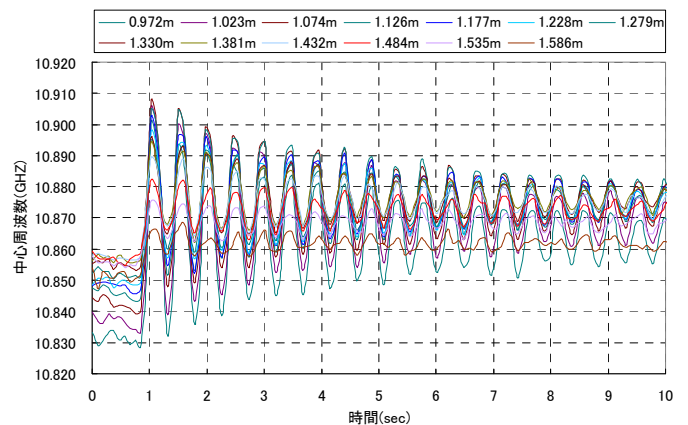
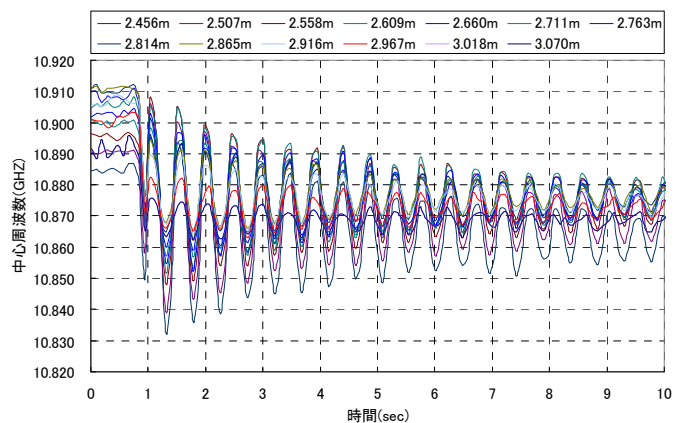


図8 様々の時間帯に測定した結果



(a)裏面(0.972m~1.586m)に貼付の光ファイバセンサ



(b)表面(2.456m~3.070m)に貼付の光ファイバセンサ

図9 試験片を振動した測定結果

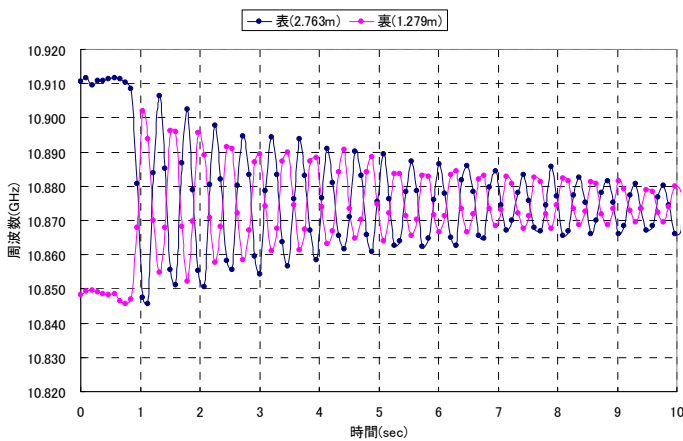
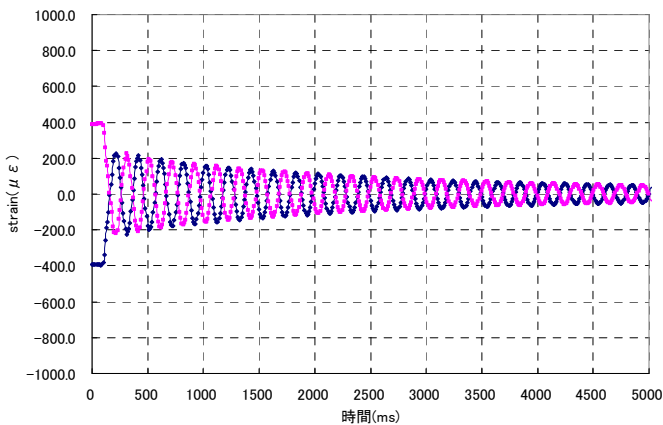
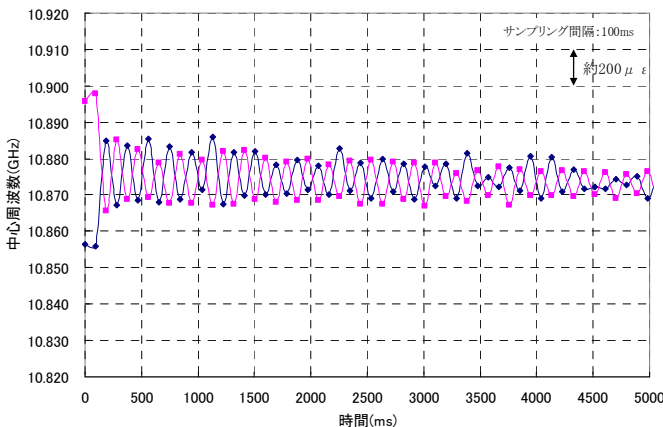


図 10 電気ゲージの位置に相当する光ファイバセンサの測定結果

さらに試験片の固定点の位置を変え、振動周波数を 5Hz までに上げて同様な測定条件で測定し、その結果を図 11 に示した。



(a) 電気ゲージの測定結果



(b) 光ファイバセンサの測定結果

図 11 5Hz の振動周波数時の測定結果

試験片の振動周波数を 5Hz 上げると、光ファイバセンサのひずみの大きさの追従性は悪くなり、振動周波数はサンプリング定理（振動数の倍以上のサンプリング速度が必要である。）から、ぎりぎり試験片の振動周期が取られていることが観察できた。

6. まとめ

PPP-BOTDA (NEUBREX NBX-6040) の高い SN 比の特徴により標準偏差 (σ) $2.5 \mu \epsilon$ の再現性が確認でき、さらに NBX-6020 の高分解能の特徴により 2cm 空間分解能が達成できた。これらの性能を活かして高速測定 (10Hz) に関する検討を行い、PPP-BOTDA (NEUBRESCOPE NBX-6040A) を開発した。NBX-6040A を使って、10cm 空間分解能、 $50 \mu \epsilon$ 測定精度 (標準偏差 σ)、10Hz 測定速度の分布測定 (1,000 データ) が達成されたことを報告した。

謝辞

本研究を進めるうえで有益な助言を頂いたニューブレクス (株) 横山光徳氏と矢崎桂子氏に深謝致します。

文献

- [1] 石岡昌人ら, "航空機搭載型 BOCDA 分布型光ファイバセンサ", 信学技報, OFT2007-10 (2007-05)
- [2] 李哲賢ら, "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", 信学技報, OFT2008-13 (2008-5)
- [3] 李哲賢, 津田 勉, 岸田欣増, "PPP-BOTDA 測定技術を用いた 10cm 分解能ブリルアン分布計測の実現", 信学技報, OFT2005-16 (2005-8)
- [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, 47, OFT, 9. Oct. 2004