

周波数シフト帰還型レーザーによる 超高精度光計測技術

原 武文^{*,**} ・ Cheikh NDIAYE^{*} ・ 伊藤 弘昌^{*}

周波数シフト帰還型レーザーは超高速で理想的に線形な周波数チャープ光源である。このレーザーを周波数領域リフレクトメトリー法に適用すると、共振器縦モード間隔内に複数のビート周波数を得ることができ、近距離より 100 km 超の超長距離まで 100 μm 程度の高精度光計測が実現される。本文では、周波数シフト帰還型レーザーによる光距離計測と光三次元形状計測研究の現状を紹介する。

Keywords : frequency-shifted feedback laser, acousto-optic frequency shifter, optical ranging, optical frequency domain reflectometry, optical imaging, optical profilometry

1. ま え が き

一般のレーザー共振器内部の光波は周波数シフトなしに再び媒質に帰還し、誘導放出を繰り返すうちに共振器条件に従う定在波が選択され、線幅の狭いレーザー発振となる。しかし周波数シフト帰還型 (Frequency-shifted feedback ; FSF) レーザーはまったく異なっている。図 1 のようにレーザー共振器内部に光周波数シフターをもつ FSF レーザーでは、光波は共振器を周回する際に強制的に周波数シフトを受けてレーザー媒質へ帰還する。ある瞬間周波数をもつ光波に着目すれば、誕生から周波数シフトを受けながら共振器利得曲線に従い増幅と衰退の道を歩み、やがて消滅する。はじめてこの共振器構造をもつレーザーは 1970 年の Streifer らの音響光学素子による波長可変制御にさか

のぼる¹⁾。その後 1988 年になり Kowalski らは定在波の存在しえないこのレーザーの研究を開始し²⁾、われわれを含めたいくつかの研究組織も加わり発振動作機構の解明を進めているが、現在も議論段階である^{3~10)}。この経緯は文献^{7,8,10)}を参照されたい。

本文では、これまでの実験結果をよく表す Nakamura, Kasahara ら^{4,5)}の提唱したチャープ周波数コムモデルを採用して議論を進める。このモデルは FSF レーザーの出力光を図 2 のような線形でかつ超高速な周波数チャープ光として考えており、この瞬間周波数 ν_0 は次式で与えられる。

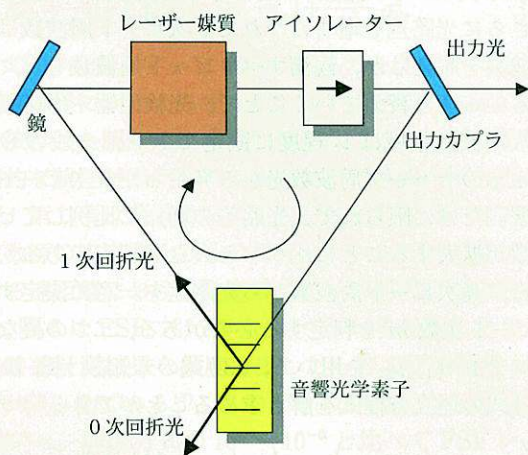


図1 FSF レーザーの基本構成。

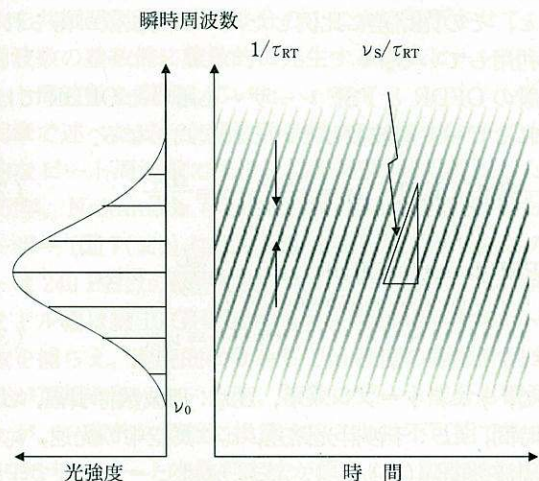


図2 FSF レーザーのチャープ周波数出力。 τ_{RT} : 共振器周回時間, ν_s : 共振器周回に光波の受ける周波数シフト, ν_0 : 種光の発生周波数。

* 東北大学電気通信研究所 〒 980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1. e-mail : tkfm@riec.tohoku.ac.jp

分類番号 7.8, 7.10

** (株)光電製作所 〒 409-0112 山梨県上野原市上野原 5278.

High-accuracy optical measurement using frequency-shifted feedback laser. Takefumi HARA^{***}, Cheikh NDIAYE^{*} and Hiromasa ITO^{*}.

* Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University (2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577)

** KODEN ELECTRONICS CO., LTD. (5278 Uenohara, Uenohara-shi, Yamanashi-ken 409-0112)

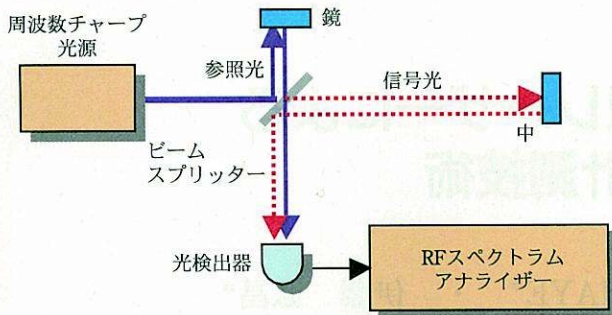


図3 OFDRの基本構成.

$$\nu_q(t) = \frac{\nu_s}{\tau_{RT}} t - q \frac{1}{\tau_{RT}} + \nu_0 \quad (1)$$

ここで ν_s : 共振器一周に光波の受ける周波数シフト, τ_{RT} : 共振器周回時間, ν_0 : 種光の発生周波数, q : コム番号 (整数) である. チャープレートは ν_s/τ_{RT} より数 kHz から数百 PHz/s ($P=10^{15}$) の幅広い範囲が得られ, 波長分散のない理想的な共振器を用いて線形性の高いチャープを容易に得ることができる. 本文では, FSF レーザーのこの周波数チャープコム出力光を用いた超高精度光距離計測の応用原理と, 光三次元形状計測について述べる.

2. FSF レーザーを用いた光距離計測

2.1 光距離計測原理と次数判定法

周波数チャープ光を用いた距離計測は Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR) として知られており¹¹⁻¹³, 図3はその基本構成である. OFDR では周波数チャープ光をプローブ光と参照光の二つの光波に分割し, 干渉計光路差を与えて再び合成し, これを光検出器で観測すると, その光路差に比例したビート周波数が得られることを利用している.

一般の OFDR と FSF レーザーを用いた OFDR では, 検出されるビート周波数はそれぞれ次式となる.

$$\text{一般の OFDR} \quad \nu_B = \gamma \frac{nL}{c_0}, \quad \gamma = \frac{\Delta\nu_T}{\Delta T} \quad (2)$$

$$\text{FSF レーザー-OFDR} \quad \nu_{Bm} = \gamma \frac{nL}{c_0} - m\nu_c, \quad \gamma = \frac{\nu_s}{\tau_{RT}} \equiv \nu_s \nu_c \quad (3)$$

ここで, γ : チャープレート, $\Delta\nu_T$: 周波数挿引幅, ΔT : 挿引時間, nL : 干渉計光路差, c_0 : 真空中の光速, ν_c : 共振器周波数間隔 ($=1/\tau_{RT}$), 整数 m はビート次数で干渉する光波間のコム番号の差である. 一般の OFDR では 0 次のビート周波数だけが得られるのに対し, FSF レーザーではコム構造によって複数本のビートが検出される点が大きく異なる. (3) 式は光路差とビート周波数についてプロットすると図4の実線となる. 点線は負のビート周波数が正の周波数へ折り返し観測されることを表す.

図5は干渉計光路差を 1,346~1,546 mm まで 10 mm

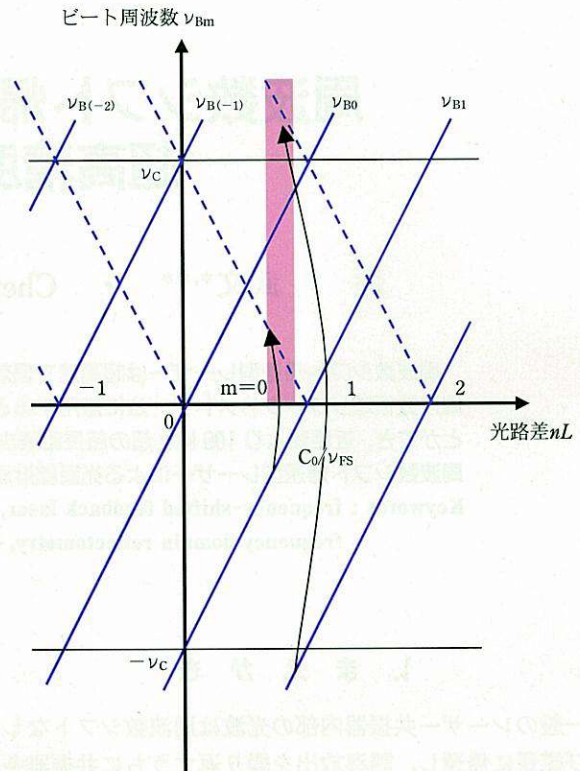


図4 FSF レーザー OFDR 法のビート周波数と光路差の関係. 点線は負のビート周波数の折り返し. ピンク色の網かけ領域は図5の観測領域を表す.

ずつ延長し, そのときの光検出器出力を RF スペクトラムアナライザーで観測したものである. 13.32 MHz の共振器周波数間隔に常に二つのビート周波数が存在し, また互いに逆方向へ連続的に移動していく. この観測範囲は図4中の網かけ領域に対応しており, 1次および2次のビート周波数が0次ビート周波数と逆行する振る舞いが説明できる. さらに光路差を増すにつれて0次ビート周波数は共振器周波数を超えるが, 観測すべきビート周波数を次々と高次のものへ切り替えていくことで, 光検出器や電子回路に必要な周波数帯域は ν_c 程度に固定できる. 一般の OFDR では1本のチャープ周波数光から発生した0次ビート周波数の観測だけに限られて, 光路差の増大に比例してビート周波数が拡大することに比べると大きな利点である.

一方, 高次ビート周波数から光路差を一意に決定するには, ビート次数 m を判定する必要がある. 二つの異なる周波数シフト ν_{s1}, ν_{s2} を用いて, (3) 式の未知数 nL, m に関し(4)式の連立方程式を解き求めることができる¹⁴⁻¹⁶.

$$\begin{pmatrix} \nu_{Bm1} \\ \nu_{B(m+\Delta m)2} + \Delta m\nu_c \end{pmatrix} = \nu_c \begin{pmatrix} \nu_{s1}/c_0 & -1 \\ \nu_{s2}/c_0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} nL \\ m \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで, Δm はビート次数変化量である. $n=0$ の同一次数のビート次数判定では, 周波数計測精度は ν_c/m 程度必要で高次の次数判定では満足できない. そこで高次の場合にはビート次数変化量をカウントし, 周波数計測精度を

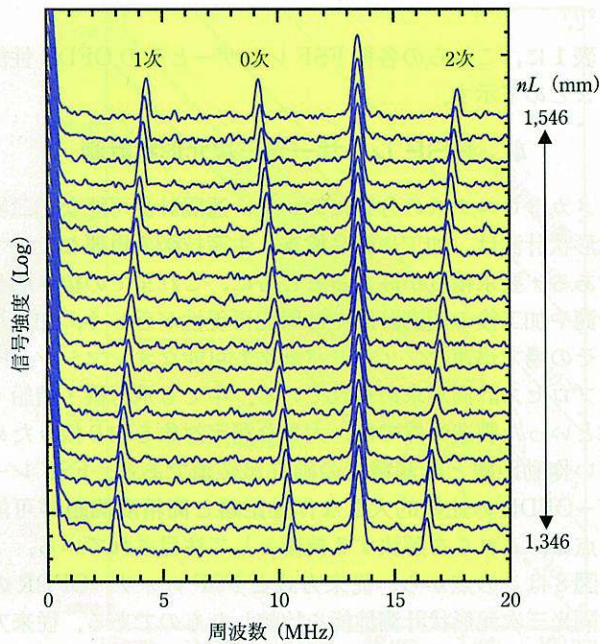


図5 干渉計光路差を1,346~1,546 mmまで10 mmずつ変化させたときのビート周波数の振る舞い。 $\nu_s=160$ MHz, $\nu_c=13.32$ MHz.

$\Delta m\nu_c/m$ に緩和して次数判定が可能となる。

2.2 光距離計測精度について

OFDRにおいて、距離分解能は複数反射点の分解能として一般に周波数チャープ幅で決まる。一方、距離計測精度は計測原理や測定誤差などのいくつかの要素に依存する。一般のOFDRおよびFSFレーザー-OFDRの計測精度 σ_{nL} は(2), (3)式より次式で表される。

$$\sigma_{nL}^2 = \frac{c_0^2}{\gamma^2} \sigma_{v_b}^2 + \frac{nL^2}{\gamma^2} \sigma_r^2 \quad (5)$$

$$\sigma_{nL}^2 = \frac{c_0^2}{\nu_c^2 \nu_s^2} \left(\sigma_{v_{bm}}^2 + \frac{\nu_{Bm}^2}{\nu_c^2} \sigma_{v_c}^2 \right) + \frac{nL^2}{\nu_s^2} \sigma_{v_s}^2 \quad (6)$$

ここで σ_x は添え字 x についての誤差を表す。(5)式の第一項は距離にかかわらず一定となる固定誤差、第二項は距離に依存した誤差で、非線形性を伴うチャープの場合には周期的な誤差が発生する。同様に、(6)式も第一項が固定誤差、第二項は距離に依存した誤差であるが、これは基準周波数源の安定度そのものである。つまり第二項が主体的となる遠距離における計測精度は基準周波数源の安定度となる。図6はFSFファイバーレーザーを使用した2,615 mの光路差計測結果を頻度で表したもので標準偏差 $\sigma_{nL}=28 \mu\text{m}$ が得られている¹⁷⁾。このときの計測精度と光路差の比は 10^{-8} と、従来方式の $10^{-5} \sim 10^{-6}$ と比べてFSFレーザーを用いたOFDRは非常に高い性能である。

3. OFDRの確認された各種FSFレーザー

FSFレーザーの特性は本質的にレーザー媒質に依存する。すでに、Sousaら⁸⁾がFSFレーザー開発の歴史についてよくまとめているので、ここではFSFレーザーの

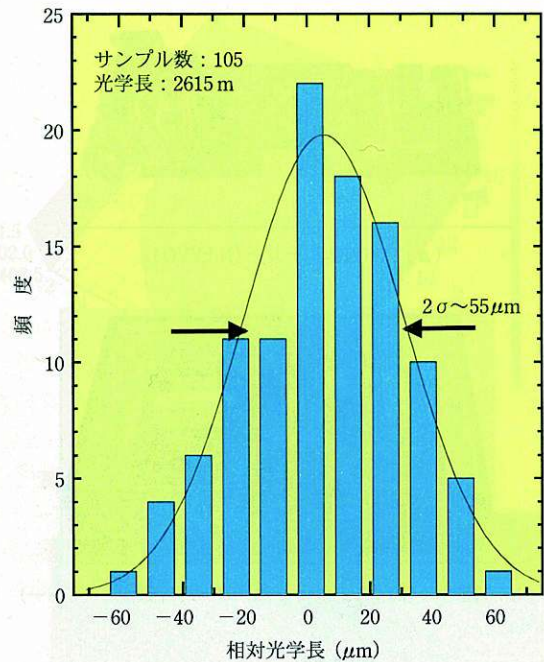


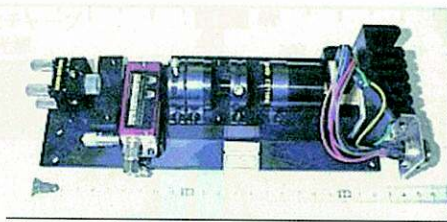
図6 FSFレーザー光距離計測のバラつき。

チャープ周波数コムの発生とFSFレーザーを用いた距離計測とに主点を置き、その進歩について述べる。

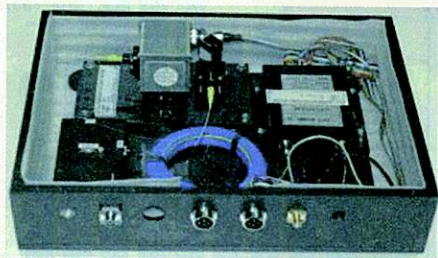
初めてFSF Laserを用いて光距離計測を行ったのは1989年Bell LaboratoriesのCoquinらの研究で、 $1.3 \mu\text{m}$ InGaAsP外部共振器用半導体レーザー(External cavity laser diode; ECLD)を増幅媒質とし、干渉計光路差に比例したビート周波数の観測を行った¹⁸⁾。またこの結果から、FSFレーザーの発振モデルとして初めてリニアチャープ周波数コムを提唱した。ただしこの距離計測は、シフト周波数を共振器周波数の500分の1にまで低下させて、シフト周波数の整数倍に離散的に発生する高コヒーレンシーなビート周波数を観測していた。

前章で述べたビート周波数は低コヒーレンシーでかつ連続的なビート周波数であり、これを初めて観測したのは1995年、NakamuraらのNd:YVO₄結晶を採用したFSFレーザー(図7(a))による研究であった^{4,5,19,20)}。このレーザーは240 PHz/sを超えたチャープ率をもち、その発振スペクトル幅は約10 GHzであった。明瞭に0次のビート周波数を捕らえ、連続的に0から1 m程度の距離計測を行うことが可能となった。当時、複数のビート成分も観測していたが、一意的に距離に換算することは不可能であった。翌1996年、ビート次数判定法が原らにより考案され¹⁴⁻¹⁶⁾、その後の距離計測可能範囲は計測対象を光ファイバーとして飛躍的に拡大した。光路差18.6 kmを19,832次のビート周波数を用いて、20 mmの距離分解能を得ている²¹⁾。このとき計測距離が拡大しても、ビートスペクトル形状がほぼ相似であること、つまり計測精度がほとんど劣化しないことも確認された。

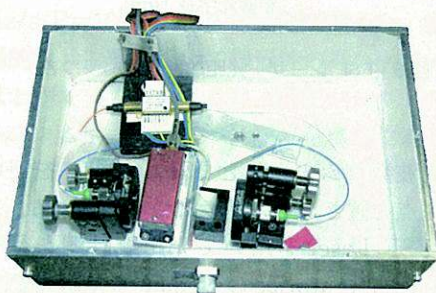
エルビウム添加ファイバー(Erbium-doped fiber; EDF)



(a) FSF固体レーザー(Nd:YVO4)



(b) FSFファイバーレーザー(エルビウム添加ファイバー)



(c) FSF半導体レーザー(SOA)

図7 各種FSFレーザーの概観。(a)FSF固体レーザー(Nd:YVO₄)、(b)FSFファイバーレーザー(エルビウム添加ファイバー)、(c)FSF半導体レーザー(SOA)

を用いたFSFファイバーレーザーによる距離計測は、Yoshidaらがリング型レーザー共振器を構成して行った²²⁾。これは通信用光ファイバーの透過帯域1.55 μmで発振し、発振線幅も100 GHzと広く、光路差150 kmの分散シフトファイバーにて距離分解能38 mmを確認した²³⁾。しかし、ファイバーレーザーでは環境的外乱により共振器内の偏波状態が乱れ、発振動作が不安定になることがわかった。このことから、σ型共振器を採用し偏波面の安定化したFSFファイバーレーザー(図7(b))によって単一偏波光出力が実現し²⁴⁾、発振線幅20~30 GHzで100 μm以下の精度が得られた。

ECLDを得る媒質としたECLD-FSFレーザーによる低コヒーレンスなビートの観測は吉澤らによって確認された²⁵⁾。しかしECLDはファブリー・ペロー共振器を構成したときに複合共振器状態を引き起こしやすく、広帯域発振動作を得ることは難しかった²⁶⁾。最近われわれは、図7(c)の半導体光増幅器(Semiconductor Optical Amplifier; SOA)によるリング型FSF半導体レーザーを用いて、60 GHz以上の発振幅と数μmの距離計測精度を達成してい

る²⁷⁾。

表1に、これらの各種FSFレーザーとそのOFDR性能をまとめて示す。

4. FSFレーザー光三次元形状計測

メカトロニクス分野において、遠隔計測可能な光三次元形状計測は、加工や製品検査、生産技術の重要なテーマである。要求精度が高まるとともに、これまでの抜き取り計測や加工後の個別計測では環境再現性が乏しく、加工したその場で迅速なフィードバックも可能なオンマシン・インプロセス計測が求められている。中でも飛行機・造船・車といった製造業界では、大きな測定対象を取り扱うため広い作動距離と計測精度の両立が必須である。FSFレーザーOFDRの比較的大きな作動距離と高精度測距が可能な点は、これらを解決する技術として注目されている。

図8はこの点から、従来方式とFSFレーザーOFDRの遠隔光三次元形状計測性能を比較したものである。従来方式の中でもOFDR法は高い性能を有していたが、さらにFSFレーザーを用いることで、これまで困難であった計測を開拓する可能性を秘めている。ただし、三次元形状計測性能はレーザースキャナーと光学系性能に大きく左右されることは、OTDR法も含めレーザーレーダー方式と同様である。

図9はガルバノ式光学スキャナーとダイレクトドライブモーターを組み合わせた高精度レーザースキャナー部で、作動距離1~10 m程度を対象として、長軸67 mmの楕円形平面ミラーを、ビーム振れ角水平±220°、垂直±60°、誤差2秒以下を目標として現在試作を進めているものである。レーザースキャナーをミラーで高速偏向し、ターゲット表面に結像させて距離計測を行い、ミラー振れ角を高精度に同時取得することが可能である。直接駆動型モーターの中空構造を利用して、対物レンズ50 mmφ、全長220 mmの送受光学系をコンパクトに収納している。開発中のFSF

表1 OFDR各種FSFレーザーとOFDR性能。

種類	固体	ファイバー		半導体	
		リング	σ	FP	リング
媒質	Nd:YVO ₄	EDF		ECLD	SOA
共振器構造	FP	リング	σ	FP	リング
発振波長[μm]	1.064	1.55	1.55	1.3, 1.55	1.55
発振幅[GHz]	~10	~100	~30	~10	~65
チャープレート[PHz/s]	240	0.68	1.2	120~840	14
測距精度*[μm]	<100	<50	<100, <10*	<12 mm	<10*
文献	7	17, 18, 24	25	26, 27	28

ここでEDF:エルビウム添加ファイバー, ECLD:外部共振器用レーザーダイオード, SOA:半導体光増幅器, FP:ファブリーペロー型。距離精度中*印は1時間のアラン分散の平方根。

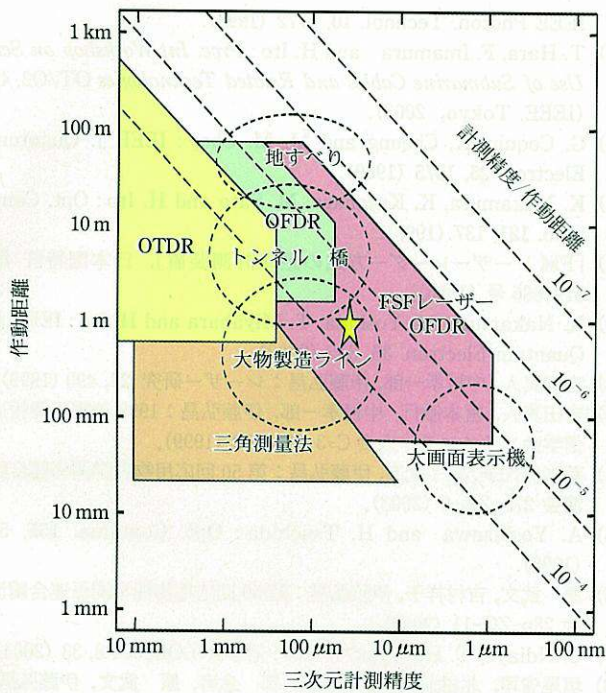
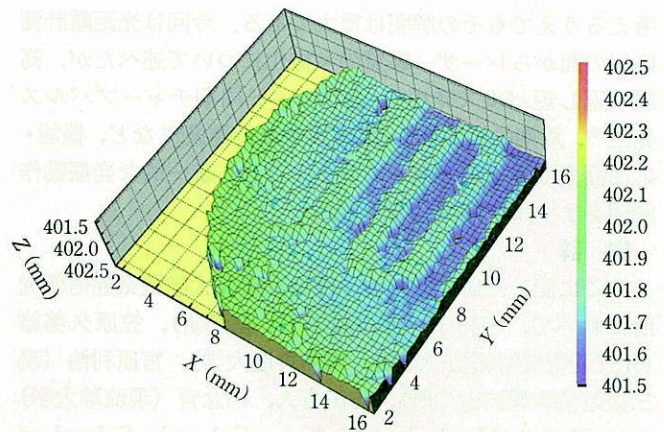
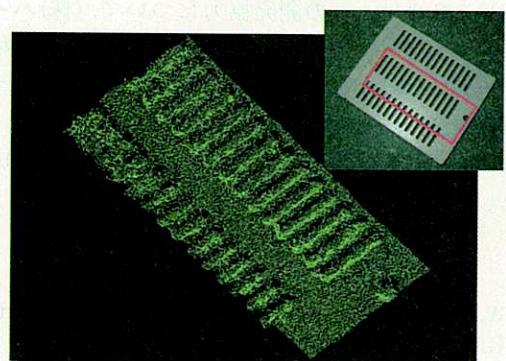


図8 FSFレーザー光三次元形状計測の位置づけ。右上隅へ行くほど高精度な計測技術。



(a) 百円硬貨表面
測定エリア：16.2×16.2 mm，測定間隔：300 μm



(b) 空気抜きスリットのある塗装鋼板。
測定エリア：96×32 mm，測定間隔：400 μmピッチ

図10 FSFレーザー三次元形状計測による約1 m 遠方の観測例。
(a) 百円硬貨表面，測定エリア：16.2×16.2 mm，測定間隔：300 μm。(b) 空気抜きスリットのある塗装鋼板，測定エリア：96×32 mm，測定間隔：400 μmピッチ。



図9 高精度レーザー scanner 部。

レーザー光距離計測装置を用いて、三次元座標値を毎秒1,000ポイントの高速取得を実現している。散乱反射減衰については光増幅器でSNRを確保しており、現在の計測精度は100 μm以下を確認している。この点を図8中の☆印で示す。

5. む す び

FSFレーザー光距離計測と三次元計測の現状について紹介した。後者はスタートしたばかりの研究で、今後は計測距離の拡大を目指すとともに、総合的な精度検証を行っていく予定である。本文では触れなかったが、FSFレーザーの安定性や量産性、寸法、価格面で従来のバルク素子型音響光学素子がネックとなりつつあり、導波路型音響光学素子の研究を推し進めている²⁸⁾。

色素レーザーの波長可変性制御に第一歩を記したこのレーザーは、その後発振モードの研究へとつながり、1990年代にはFSFレーザーの名を得た。しかし発振動作機構の解明はまだ議論段階であり、光距離計測の原理的境界を

考えるうえでもその解明は重大である。今回は光距離計測応用の面からレーザー媒質の多様化について述べたが、高繰り返し短パルス発生⁸⁾、強制モード同期チャープパルス発生²⁹⁾、周期的相関性⁹⁾、広帯域多波長発振³⁰⁾など、機能・応用面では多様化が進んでいる。これら統一的な発振動作解明もますます期待が高まる。

謝 辞

ここに記した研究成果の一部は、東北大学電気通信研究所において、中村孝一郎（現 NTT 基礎研）、笠原久美雄（元三菱電機情報技術総研、現名古屋大学）、宮原利治（現三菱電機情報技術総研）、吉田真人、鄒念育（現琉球大学）らの諸氏と行ったものであり、Colorado School of Mines の Kowalski 氏にも深く感謝の意を表します。またレーザースキャナーの開発協力について（株）ハーモニク・ドライブ・システムズ社に感謝致します。本稿の一部のデータは（株）光電製作所が受けた科学技術振興事業団委託開発事業の開発機にて取得されました。

Ndiaye は国際コミュニケーション基金（ICF）に感謝いたします。

文 献

- 1) W. Steifer and J. R. Whinnery: *Appl. Phys. Lett.* **17**, 335 (1970).
- 2) F. V. Kowalski, S. J. Shattil, and P. D. Hale: *Optics Lett.* **13**, 622 (1988).
- 3) S. Balle, I. C.M. Littler and K. Bergmann: *Optics Comm.* **102**, 166 (1993).
- 4) K. Nakamura, F. Abe, K. Kasahara, T. Hara, M. Sato and H. Ito: *IEEE J. Quantum Electron.* **33**, 103 (1997).
- 5) K. Kasahara, K. Nakamura, M. Sato and H. Ito: *IEEE J. Quantum Electron.* **34**, 190 (1998).
- 6) F. V. Kowalski, K. Nakamura and H. Ito: *Opt. Commun.* **147**, 103 (1998).
- 7) 中村孝一郎, 伊藤弘昌: *応用物理* **68**, 1014 (1999).
- 8) J. M. Sousa and O. G. Okhotnikov: *Opt. Commun.* **183**, 227 (2000).
- 9) F. V. Kowalski, C. Ndiaye, K. Nakamura and H. Ito: *Opt. Commun.* **231**, 149 (2004).
- 10) L. P. Yatsenko, B. W. Shore and K. Bergmann: *Opt. Commun.* **236**, 183 (2004).
- 11) B. Golubovic, B. E. Bouma, G. J. Tearney and J. G. Fujimoto: *Opt. Lett.* **22**, 1704 (1997).
- 12) K. Tsuji, S. Shimizu and T. Horiguchi: *J. Lightwave Technol.* **15**, 1102 (1997).
- 13) 飯山宏一, 板倉章太郎, 前田隆宏, 橋本松進, 高宮三郎: *信学技報 LQE98-14*, 79 (1998).
- 14) 原 武文, 中村孝一郎, 伊藤弘昌: *光学連合シンポジウム福岡'96 講演予稿集 6aC04*, 57 (日本光学会, 福岡, 1996).
- 15) 「光学式距離計」, 日本国特許 第 3583906 号 (1997).
- 16) K. Nakamura, T. Miyahara, M. Yoshida, T. Hara and H. Ito:

- IEEE Photon. Technol.* **10**, 1772 (1998).
- 17) T. Hara, F. Imamura and H. Ito: *Proc. Int. Workshop on Sci. Use of Submarine Cables and Related Technologies OT/O2*, 45 (IEEE, Tokyo, 2003).
- 18) G. Coquin, K. Cheung and M. M. Choy: *IEEE J. Quantum Electron.* **25**, 1575 (1989).
- 19) K. Nakamura, K. Kasahara, M. Sato and H. Ito: *Opt. Commun.* **121**, 137 (1995).
- 20) 「FM レーザーレーダー方式の距離計測装置」, 日本国特許 第 3194686 号 (1995).
- 21) K. Nakamura, M. Yoshida, T. Miyahara and H. Ito: *IEEE J. Quantum Electron.* **36**, 305 (2000).
- 22) 吉田真人, 中村孝一郎, 伊藤弘昌: *レーザー研究* **27**, 490 (1999).
- 23) 吉田真人, 宮本敏行, 中村孝一郎, 伊藤弘昌: 1999 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 C-3-66, 172 (1999).
- 24) 藤本美代子, 原 武文, 伊藤弘昌: 第 50 回応用物理学関係連合講演会 27a-ZK-9 (2003).
- 25) A. Yoshizawa and H. Tsuchida: *Opt. Commun.* **155**, 51 (1998).
- 26) 原 武文, 吉村祥子, 伊藤弘昌: 第 50 回応用物理学関係連合講演会 28p-ZQ-11 (2003).
- 27) C. Ndiaye, T. Hara and H. Ito: *信学会 LQE2004* **8**, 33 (2004).
- 28) 垣尾省司, 北村通英, 中川恭彦, 鄒 念育, 原 武文, 伊藤弘昌, 飯塚 孝, 小林哲也, 渡辺正行: *信学論 CJ86-C*, 1263 (2003).
- 29) M. Yoshida *et al.*: *Tech. Dig. CLEO 2001*, 299 (2001).
- 30) S. K. Kim, M. J. Chu and J. H. Lee: *Opt. Commun.* **190**, 291 (2001).

(2005 年 2 月 21 日 受理)



はら たけふみ
原 武文

1988 年千葉工業大・工・電子卒。同年(株)光電製作所, マリンレーダーに関する研究開発に従事。02 年東北大学工学研究科博士後期課程修了。周波数シフト帰還型レーザー, 光学式津波計測ネットワークに関する研究に従事。02 年度電子情報通信学会論文賞受賞。博士(工学)。応用物理学学会会員。



Cheikh NDIAYE

2000 年東北大・工・電子卒, 02 年同大学院工学研究科修士課程修了, 同博士後期課程在学中。周波数シフト帰還型レーザーに関する研究に従事。応用物理学学会会員。



いとう ひろまさ
伊藤 弘昌

1966 年東北大・工・通信工卒, 72 年同大学院工学研究科博士課程修了。同大電気通信研究所助手, 助教授を経て, 現在同研究所教授兼所長。01~03 年同大未来科学技術センター, 副センター長, およびセンター長歴任, 理化学研究所フォトダイナミクス研究センター, テラフォトニクスチームリーダーを兼務。レーザーおよび非線形光学とその幅広い応用の研究に従事。工学博士。71 年度米沢記念学術奨励賞, 89 年度, 02 年度電子情報通信学会論文賞, 00 年レーザー学会論文賞受賞, 応用物理学学会, 電子情報通信学会, 日本光学会, レーザー学界, IEEE 各会員, OSA Fellow, 01 年度信学会エレクトロニクスソサイエティ会長。