



光ファイバとその応用—X

光ファイバ応用部品 (3)—光ファイバ干渉計・
分布型光センサー・関連技術

保立和夫

東京大学先端科学技術研究センター 〒153 東京都目黒区駒場 4-6-1

(1990年5月30日受理)

Optical Fiber and Its Applications—X

Fiber Optic Devices (3)—Optical Fiber Interferometer,
Distributed Optical Sensor and Related Technologies

Kazuo HOTAIE

RCAST, Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo,
4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153

1. はじめに

前回、光ファイバジャイロの研究の中で単一モードファイバ型光デバイス¹⁾が果たした役割を紹介した²⁾。これらのデバイスは、光ファイバを活用した他のセンシング技術の進展にも寄与している³⁾。今回はその概要を述べる。関連して、通信分野での応用等にもふれよう。

光ファイバカプラーの登場で干渉計における光波間の位置合せが不要となった。この光ファイバ干渉計は、高感度なセンサーとして注目されているほか、コヒーレント光ファイバ通信システムの受信部として重要である。一本の光ファイバに沿って多くのセンサーを配置する多点型・分布型の光ファイバセンサーも研究されているが、これも光ファイバカプラーの登場の結果可能になったものといえる。

上記の各種光ファイバ干渉計構成にあって、光ファイバ中での偏波変動への対策が必要となる。ここでも単一モードファイバ型光デバイスが活用される。稀土類元素、とくにエルビウムを含む光ファイバが光増幅素子として注目されている。前回も若干述べたが、このファイバにより光源が構成でき、さまざまな応用が期待される。

これらが今回の主な話題である。最後に単一モードフ

ァイバ型光デバイスの故障診断技術にもふれる。

2. 光ファイバ干渉計システム

2.1 光ファイバ干渉計型センサー

図1(a)は、ファイバカプラーとファイバ型位相変調器により構成されたセンサーの実験系である⁴⁾。マッハ・ツェンダー干渉系の一方のアームがセンサー、他方は参照用である。単一モードファイバの伝播光位相は、圧力、振動、音波等に対して高感度に応答する³⁾。したがってこれらの物理量のセンサーが構成できる。ファイバに適当な被覆を施せば、電流・磁界、電圧・電界等のセンサーにもなる³⁾。長尺ファイバをループ状にしたセンサーヘッドによりさらに感度向上が図られ、たとえば水中の音響センサーでは、他の従来型の方式を上まわる感度を達成している³⁾、ただし、機械的変動や温度変動による低周波のドリフトへの対策が不可欠である。通常信号としてはこれらドリフトより高い周波数成分のみを考える。

図1中の二つの受光器出力の差動成分は、二つのアーム間の位相差 θ に対して $\cos\theta$ を示す。ここで θ には、低周波数でかつ振幅の大きなドリフト θ_a と、交流でかつ比較的小さい振幅の信号成分 θ_s とが含まれる。ローパスフィルタにより θ_a 成分のみを取り出し、ファイバ

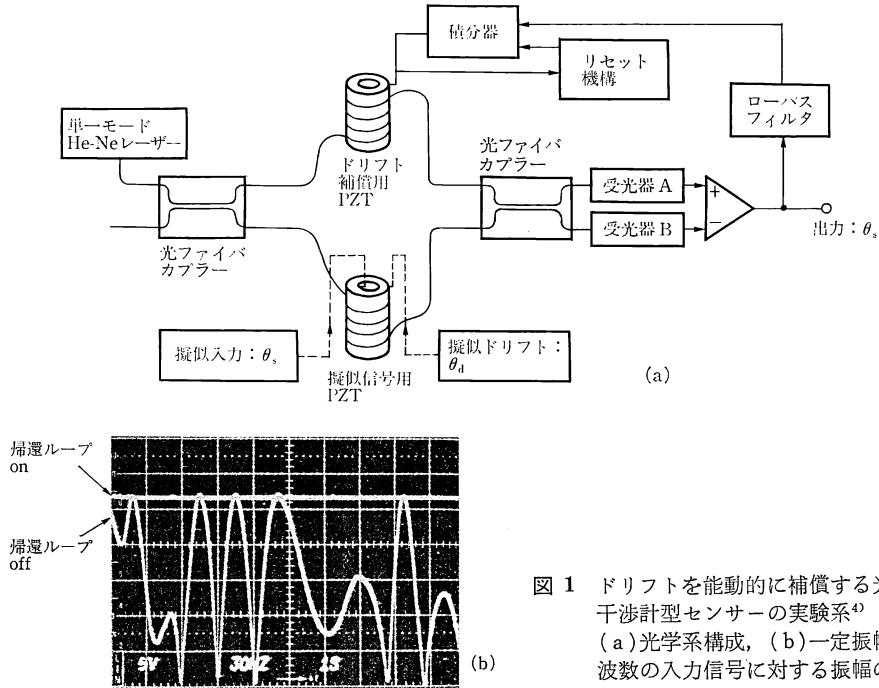


図 1 ドリフトを能動的に補償する光ファイバ干渉計型センサーの実験系⁹⁾
(a) 光学系構成, (b) 一定振幅・一定周波数の入力信号に対する振幅の測定結果

型位相変調器に負帰還すると、干渉計出力は $\sin \theta_s$ となって、 θ_s に対して高感度に応答できる。逆にこのような対策を施さないと、 θ_s に対する感度が変動し、とくに θ_a が π の整数倍のとき入力 θ_s に対してまったく感度を持たない。同図 (b) は、一定振幅、一定周波数の入力に対して測定された振幅を示したもので、負帰還により安定化が図られたことがわかる。このような手法によって $\sim \mu$ rad の位相変化の測定が可能である。

二つのアームに光路差を与えておくと、受光器上での 2 光間の位相差は入射光波の周波数変化に比例する。半導体レーザーでは、注入電流の変化に比例した周波数変化が得られるので、上記 θ_a をこの注入電流に帰還しても干渉系の安定化が図られる^{5,6)}。この手法においては、帰還ループの帯域を広げて θ_s も帰還すれば、センサー入力 θ_s は注入電流変化として求められる^{5,6)}。これは零位法と呼ばれ光強度の変動による影響を受けずに済む。

上記の干渉計では 2 光の周波数は同一、つまり光ホモダイン干渉計である。二つのアームの一方に光周波数シフタを挿入した光ヘテロダイン干渉計では、電気的な中間周波数が得られ、その位相変化は θ である。電気的なさまざまな位相測定手法が活用でき、安定化、感度の最適化が可能となる。光周波数シフタを用いずに出力処理によって中間周波数を合成する方法も検討されている^{3,7)}。

2.2 ドリフトの受動型補償法

ドリフトを受動的に補償する方法もある。ここでは、特殊ファイバカプラーの一つとして前々回紹介した 3×3 カプラーの応用例を説明する⁸⁾。

図 2 (a) のような構成では、受光器 D_2 および D_3 の

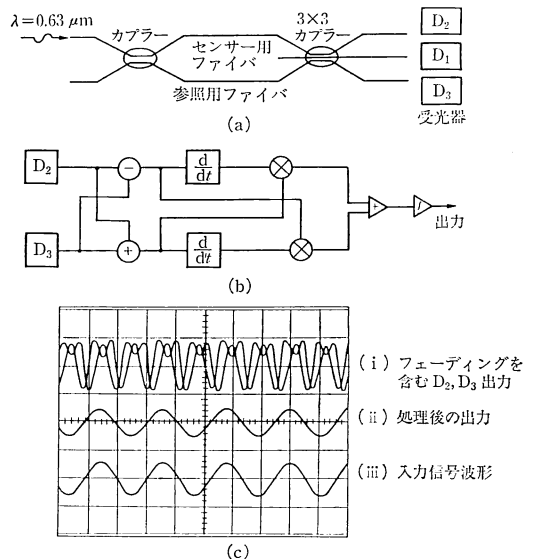


図 2 3×3 光ファイバカプラーによる受動型ドリフト補償法⁸⁾
(a) 光学系, (b) 信号処理系, (c) 特性例

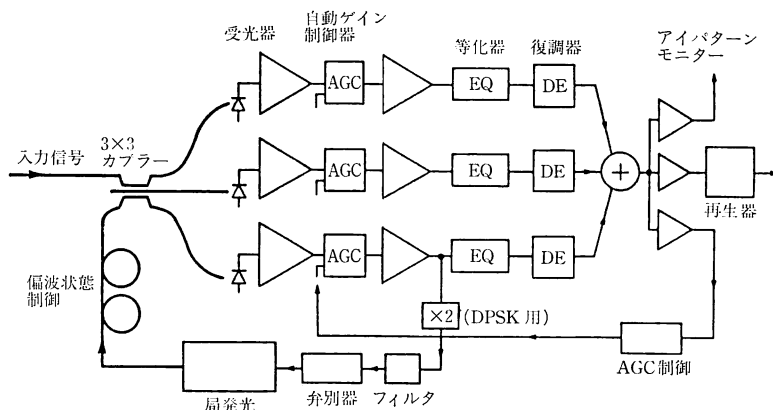


図3 3×3光ファイバカプラーによるコヒーレント光通信用位相ダイバーシティ受信機の構成例¹⁰⁾

出力は、それぞれ

$$P_1 = B_1 + B_2 \cos \theta + B_3 \sin \theta \quad (1)$$

$$P_2 = B_1 + B_2 \cos \theta - B_3 \sin \theta \quad (2)$$

となる。ここで、 $B_1 \sim B_3$ は光源の出力、カプラーの結合係数などできる定数である。 B_1 は干渉出力中の直流分であるので、これはエレクトロニクス中で取り除け、同図 (b) の演算によって入力位相 θ が得られる⁸⁾。ただし、ファイバ中での偏波変動により各係数が変化するので、実用上は偏波維持ファイバによる 3×3 カプラーが必要である。図 (c) は本システムの出力である。上段は処理前の D_1 および D_2 の出力でフェーディングを含んでいる。中段は処理後の出力で、フェーディングが消え、下段の入力信号と一致している⁸⁾。

2.3 コヒーレント光通信における位相ダイバーシティ

コヒーレント光通信技術においては、信号光と局発光とを干渉させることにより感度向上や周波数多重が行える⁹⁾。ここでも、両光の周波数を同一とする光ホモダイン受信と、差を持たせて中間周波数を作る光ヘテロダイン受信とがある。光ホモダイン受信の方が受光器に要求される帯域が狭く、また理論的には感度も高い。しかし、上記のセンサーとは異なり二つの光源からの光を干渉させる必要から、位相差変動の能動的な補償は難しい。そこで、上記の受動型補償法と類似の手法が考案されている。コヒーレント光通信分野では、これを位相ダイバーシティと呼ぶ⁹⁻¹¹⁾。

図3は3×3カプラーを用いた位相ダイバーシティ受信機である¹⁰⁾。ASK(amplitude shift keying)やDPSK(differential phase shift keying)といった変調法により復調器の具体的な構成は異なるが、信号光と局発光間の位相差が揺れでも出力の劣化は生じない。

損失のない理想的な3×3カプラーでは、三つの出力は互いに120度ずつ位相がずれる。そこで、3×3カプラーを120度ハイブリッドと呼ぶ。原理的には、センサーに関連して示したように、互いに90度位相のずれた二つの信号が得られればよく、90度ハイブリッドが理想的である。しかし、これを導波路型あるいはファイバ型で構成するのは、複雑になり難しい^{12,13)}。3×3カプラーが用いられる理由はここにある^{10,14)}。ちなみに、通常の3dBカプラーは180度ハイブリッドとして働き、二つの出力は互いに π の位相差を持つ。

最近では、信号光と局発光間の位相差を能動的に補償する手法も可能になっている¹⁵⁾。また、位相ダイバーシティ方式と光ヘテロダイン方式の両者の利点をあわせて持つ手法も考案されている¹⁶⁾。

3. 分布型・多点型光ファイバセンサー

3.1 構成法の分類

光ファイバが情報伝送路であることを積極的に利用する方式として、分布型ないしは多点型の光ファイバセンサーが研究されている¹⁷⁻²⁰⁾。表1にその構成方式を分類した。図4はこれらの光学系の概念図である。

分布型は、光ファイバの全長にわたりどこでもファイバ自身がセンサーとして働く構成である。光ファイバ中の後方レーリー散乱(強度、偏波状態)分布、後方ラマン散乱分布、ブリルアン散乱分布、偏波維持光ファイバの偏波結合係数分布等、光ファイバの属性そのものを用いて、温度、圧力、歪み等の分布計測を行う。位置の判定には、入射光パルスに対する反射光を時間領域で測定するOTDR(optical time domain reflectometry)法²¹⁾が主に用いられている。

準分布型では、被測定量によりファイバ属性を変化さ

表 1 分布型, 準分布型および多点型光ファイバセンサー

分類	構成	センシングにあずかる光ファイバの属性	トランスデューサ原理	分離技術	使用ファイバ	被測定量
分布型	光ファイバ全長にわたり, どこでも光ファイバ自身がセンサーとして作用し, 被測定量の変化で伝播光の属性が変る	後方レーリー散乱 (強度) 後方レーリー散乱 (偏波) 後方ラマン散乱 (強度) ブリルアン散乱 損失分布 モード結合	レーリー散乱の温度, 圧力依存性 アンチストークス光の温度依存性, ブリルアンシフトの歪み依存性 エバネッセント波の吸収	OTDR POTDR OFDR FMCW インコヒーレント干渉計	液体コアファイバ 石英ファイバ 偏心コアファイバ 偏波維持ファイバ Few-modes fiber	温度 圧力 歪み 油漏れ etc.
準分布型	光ファイバ全長にわたり, 任意の位置に設けたトランスデューサにより伝播光の属性を変えらる	同上	曲げ損失 マイクロベンディング損失 エバネッセント波の吸収 その他の損失 フェラデー効果 蛍光	OTDR POTDR OFDR FMCW	多モードファイバ 単一モードファイバ ドープトファイバ	温度 圧力 放射線 磁界 電流 etc.
多点型	光センサーないしは光ファイバセンサーを多数個光ファイバでつないで, 各センサーからの信号を適当な手法で分離検出する	光ファイバは伝送路としてのみ使用される	強度変調型 位相変調型 周波数変調型 etc.	時分割, 周波数分割, 波長分割, コヒーレント分割	多モードファイバ 単一モードファイバ 偏波維持ファイバ	音響波 温度 圧力 等, 多数

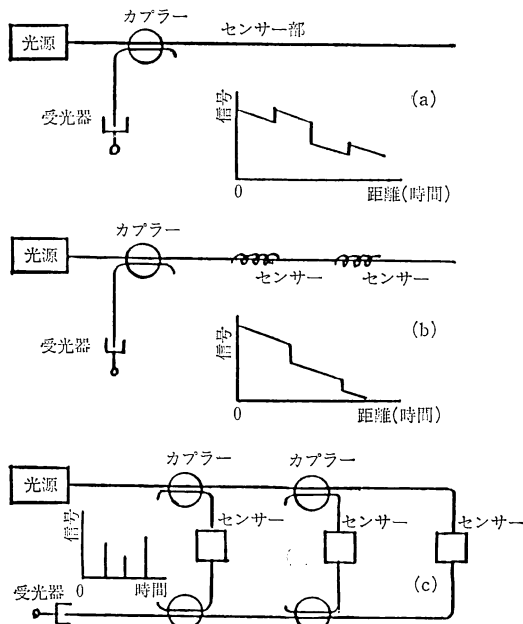


図 4 分布型, 準分布型および多点型光ファイバセンサーの光学系構成の概念図

せるトランスデューサをファイバに沿って任意の位置に数箇所設ける。トランスデューサの工夫により被測定量としてさまざまなものが扱える。

多点型では, 光ファイバは単に信号伝送路として用いられ, 強度変調型, 位相変調型, 周波数変調型等の光セ

ンサーを光ファイバで繋いだ構成である。光ファイバカプラー等の登場により実現できた構成である。各センサー出力の分離には, 時分割法, 周波数分割法, 波長分割法のほか, コヒーレント分割法という手法も開発されている。

以下に, 幾つかの研究例を示そう。

3.2 分布型・準分布型光ファイバセンサー

液体コア光ファイバ²²⁾ や, 石英系光ファイバ²³⁾ のレーリー散乱の温度変化を利用した温度センサーが研究されたの続き, より安定で, かつ感度の高い方式として, Dakin らにより後方ラマン散乱を用いる方式が提案された²⁴⁻²⁶⁾。ストークス光とアンチストークス光との強度比が温度によって比較的大きく変化するのを利用するもので, 図 5 (a) の分光器と OTDR との組合せにより²⁵⁾, 同図 (b) のデータが得られた²⁶⁾。この分布型温度センサーは, 最近幾つかの機関において実用化が図られている^{27, 28)}。

また, ファイバ中でのブリルアン散乱の周波数シフトをファイバに沿って分布計測する手段も発明され, ファイバに加わる歪み分布の測定手法として注目されている²⁹⁾。

準分布型のためのトランスデューサとしては, たとえば, 光ファイバに形状記憶合金のコイルを巻いた温度センサー³⁰⁾, 液体により膨張する材料を螺旋状のワイヤでファイバに巻きつけベンディング損失を起こさせるこ

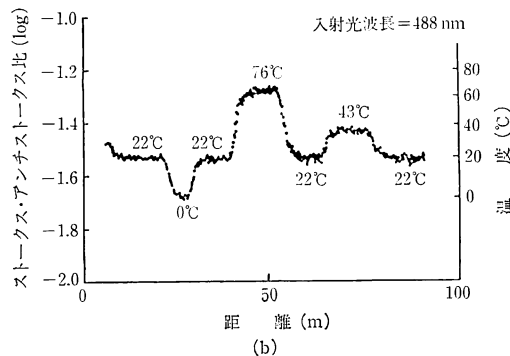
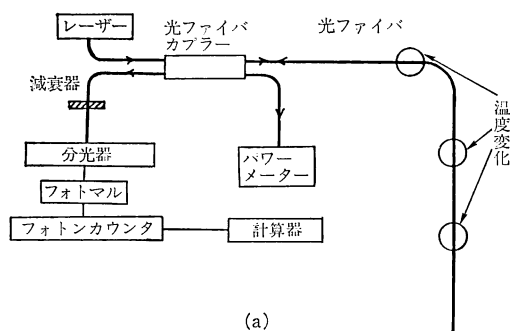


図5 光ファイバ中でのラマン散乱を用いた分布型温度センサー (a) 光学系構成例²⁵⁾, (b) 温度分布の測定例²⁶⁾

とで液体を検知するセンサー³¹⁾, 等の研究がある¹⁷⁻²⁰⁾.

3.3 多点型光ファイバセンサー

多点型光ファイバセンサーでは, 図4(c)に示したようにファイバコプラーが主役を演じる.

2章で述べたような干渉型センサーを時分割によって多重化した例を示そう³²⁻³⁴⁾. 図6の系で, Sn はマッハ・ツェンダー型の干渉計センサーである³⁴⁾. 入射光は, AOM 光スイッチによりパルス変調されてセンサー系へ導かれる. 受光器出力中には各センサー出力が時分割多重されている. この出力からゲートによって各センサー出力を分離する. マッハ・ツェンダー干渉計の二つのアームには数 cm の光路差があり, また, 半導体レーザーの直接周波数変調特性によって入射光波には周波数 ω の周波数変調が施されている. このとき, 干渉する 2 光波間の位相は周波数 ω で変調を受ける. ゲートで切り出された各センサーに対応した出力を周波数 ω および倍調波 2ω によって同期検波すると, センサーへの位相入力 θ_n に対して, それぞれ $\sin \theta_n$, および $\cos \theta_n$ という信号が検出される. 適当な演算によってセンサー入力 θ_n を得ている³⁴⁾. これは, 一種の位相ダイバーシティである. 図6(b)は, 10 個のセンサー出力が時分割多重された実験結果である. この実験では, $12\sim 18\mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ の感度が得られている³⁴⁾.

本分野に特徴的な手法として, コヒーレント分割法が

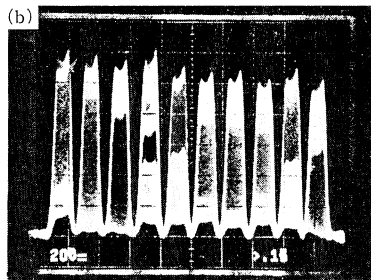
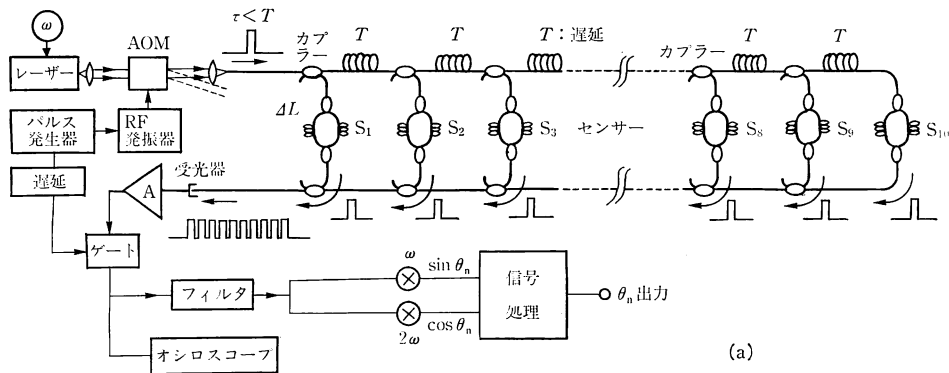


図6 光ファイバ干渉計センサーの時分割多重法³⁴⁾ (a) 光学系構成, (b) 受光器出力例

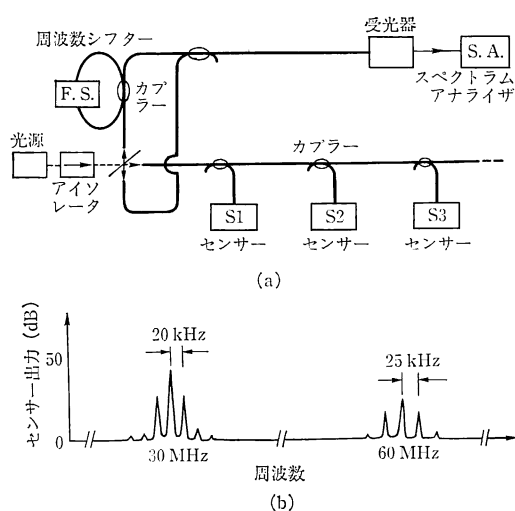


図7 低コヒーレント光源による選択的干渉を利用した光ファイバセンサーの周波数分割多重法³⁶⁾
(a) 光学系構成, (b) 位相変調入力
の分離検出結果

ある^{35,36)}。これは、低コヒーレンス光源を用い、光波を選択的に干渉させてセンサー出力の分離を行うものである。図7は、筆者らが提案した方式で³⁶⁾、コヒーレンス分割法と周波数分割法とを組み合わせた構成である。図中で F.S. は光遅延ループ中に設けた周波数シフターであり、本ループで n ターンの遅延を受けた光波は、センサー n からの信号光と光路差がゼロになるように配置されている。遅延ループを n ターンした光波は、 $n * f$ (f は F.S. のシフト量) だけ周波数がシフトしているため、センサー n の出力は、キャリア $n * f$ の変調波として分離検出される。同図 (b) は、基礎実験系により二つのセンサーへの位相変調信号を分離検出した結果である³⁶⁾。

低コヒーレンス光源の選択的な干渉を活用することで、干渉型ファイバセンサーにおける長尺なリードファイバから混入する雑音の除去³⁷⁾など、他の機能も付加できる。

4. 光ファイバ型偏波制御システム

干渉計においては、上述した2光波間の位相差変動への対策とともに、2光波間の偏波状態の不一致に対する対策が必要である。直交した二つの偏波間には干渉が生じないからである。光通信ではファイバ長がきわめて長い場合、高価な偏波維持ファイバよりも通常の単一モードファイバが好ましい。そこで、コヒーレント光ファイ

バ通信システムにおいて、局発光として偏波の直交する二つの成分を用意し、それぞれ信号光と干渉させる手法が考案されている。これは、偏波ダイバーシティと呼ばれる³⁸⁾。偏波と位相の二つのダイバーシティを組み合わせる方式もある³⁹⁾。

局発光の偏波状態を能動的に制御して、信号光のそれと一致させる手法もある。ここでも、単一モードファイバ型光デバイスが有効である⁴⁰⁻⁴³⁾。前々回紹介したように、ファイバにより波長板ができる。これを複数組み合わせるとその相対的な角度を調整すれば、任意の偏波状態が作られる。このほか、ファイバをクラック状にしてこれを回転する機構を組み合わせる手法もある⁴³⁾。また、直交する二つの偏波間の位相差が制御できるデバイスを、ある固定の角度を持たせて並べ、それぞれの位相差を調整しても同様の機能が得られる⁴¹⁾。ファイバに側圧を加える機構⁴²⁾、偏波維持ファイバを伸縮する機構⁴¹⁾、ファイバ中でのファラデー効果を用いる手法⁴¹⁾ 等でこの位相差が作られる。制御信号は偏波状態を測定して計

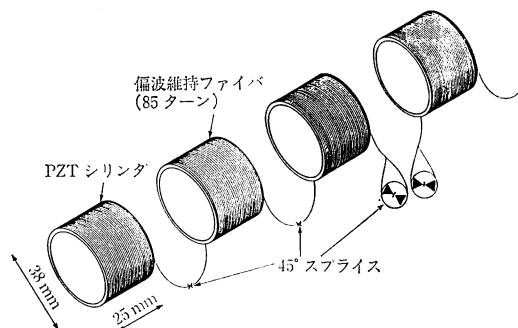


図8 圧電性シリンドラに巻かれた偏波維持光ファイバを組み合わせた偏波状態制御素子⁴¹⁾

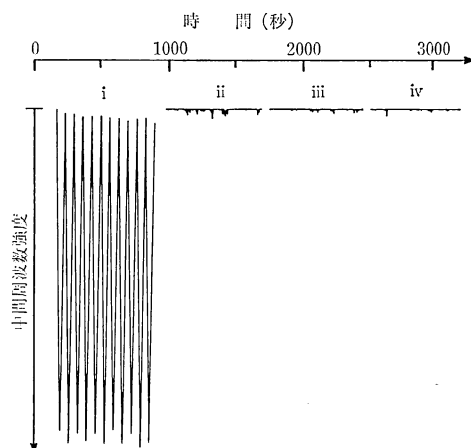


図9 偏波状態制御による中間周波数強度の安定化⁴¹⁾
領域 i : 制御なし, 領域 ii ~ iv : 制御あり

算機により求めるのが普通である。さまざまなアルゴリズムが研究されている。詳細は文献に譲るとして、構成と実験結果の一例を紹介しよう。

図8は、圧電シリンダに偏波維持光ファイバを巻いたデバイスを四つ縦列につないだ構成である⁴¹⁾。各デバイスでは直交する二つの偏波モード間の位相差が制御される。四つのデバイスの偏波軸は互いに45度ずつずらして接続してある。図9は、光ヘテロダイン方式で得られる中間周波数の振幅を測定した結果である⁴¹⁾。領域iでは制御を行っておらず、偏波状態の変化により中間周波数の振幅が大きく変動している。領域ii~ivは制御により偏波状態の一致が図られたことを示している。

5. 光ファイバ型光源

前回、干渉型光ファイバジャイロ用の光源としてファイバ型光源が注目され始めていることを述べた。これは低コヒーレンスの光源を指向したものであったが、逆に高コヒーレンス光源もファイバ型で構成できる。

先に紹介した低コヒーレンス光源では、Ndドープファイバを用い、励起は色素レーザーであった。励起光源として波長830nmの半導体レーザーを用いた研究により、この波長帯を用いると10ppm/度以下という高い中心波長の温度安定性が得られることが報告されている。波長幅は19nmであった⁴⁴⁾。

最近Erをドープしたファイバによる増幅器が活発に研究され、その優れた特性が注目されている⁴⁵⁾。1.5 μm 帯の出力が得られ、これは光ファイバの最低損失波長と一致する。すでにこの増幅器を25段つないで2,200kmに及ぶ光伝送実験が報告され⁴⁶⁾、今後の光通信システムの研究・開発の流れを大きく変えようとしている。ファイバ型低コヒーレント光源にもこのErファイバを活用する試みが見られ⁴⁷⁾、10.9nmの波長幅が達成されている⁴⁸⁾。この実験ではArイオンレーザーの波長514.5nmの光が励起に用いられた。Erドープファイバにとってはこの波長では励起効率が悪い。波長1.48 μm の半導体レーザーによる励起で効率の向上を図り、80mWの励起パワーで4mWの出力を得た報告もある。ここでは、波長幅は2nmであった⁴⁹⁾。

上記ファイバを含む共振器を構成すれば、高コヒーレント光源の実現も可能である。Ndドープファイバに続いて^{45,50,51)}、最近Erドープファイバによる実験が報告されている。リング共振器構成により、文献⁵²⁾において初めて単一モード発振に成功している。発振光のスペクトル半値全幅は10kHz以下であった。ただしここで

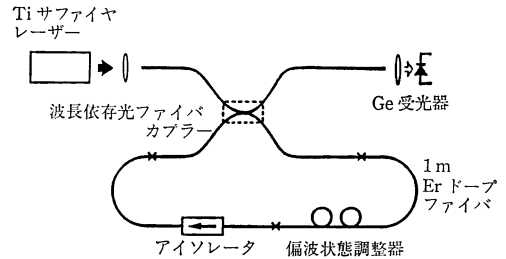


図10 エルビウムドープファイバでのリング共振器構成による高コヒーレントファイバレーザー⁵³⁾

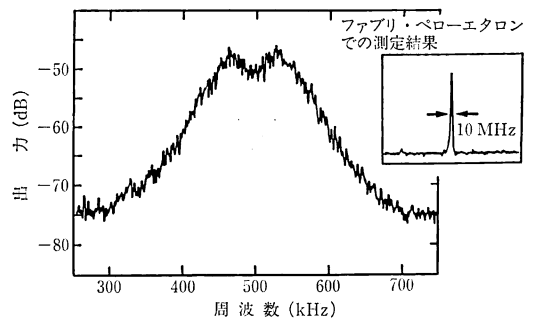


図11 単一発振モードのスペクトル特性⁵³⁾

は、リング共振器を左右に伝播する二つの発振が存在した。図10は、リング共振器中にアイソレータを挿入して完全に一つの発振光とした実験系である⁵³⁾。ファイバ長は1m、励起波長は980nmである。この波長もErドープファイバにとって効率の良い波長である。図11は得られたスペクトルで、半値全幅は60kHzである⁵³⁾。

6. 光ファイバ型デバイスの評価手法

これまでで紹介してきたように、多くの単一モードファイバ型光デバイスが実現され、それを用いた光システムが研究・開発されている。これに対応して、これらデバイスおよびシステムの特性格評価と故障診断手法の確立が必要になっている。デバイスやシステム中で生じる反射や、後方散乱の分布が求められれば、破断箇所や損失特性がわかる。この目的で、反射光分布計測法：リフレクトメリーの研究が注目される。このとき、デバイスの大きさを考慮すると、ミリメートルないしはそれ以下の空間分解能が要求される⁵⁴⁾。

これまで、極短光パルスの反射を時間領域で計測する手法⁵⁵⁾、これのフーリエ変換に対応した周波数領域での手法⁵⁶⁾、入射光の周波数を掃引するFMレーダーの原理に基づく手法⁵⁷⁾、低コヒーレンス光源による干渉系を活用する手法^{58,59)}等が研究されている。しかし、これらには、高速応答の受光器が必要^{55,56)}、システムが複

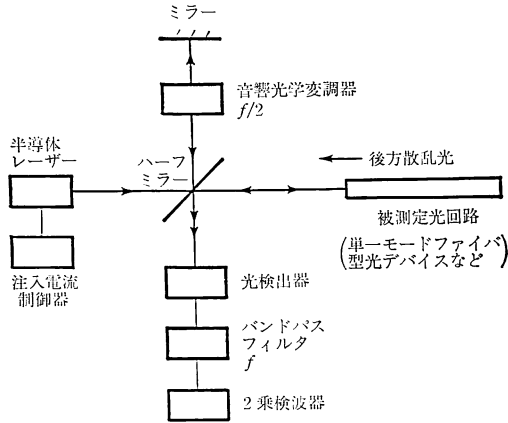


図 12 光波コヒーレンス関数の合成による高分解能リフレクトメトリーの構成図⁶⁰⁻⁶²⁾

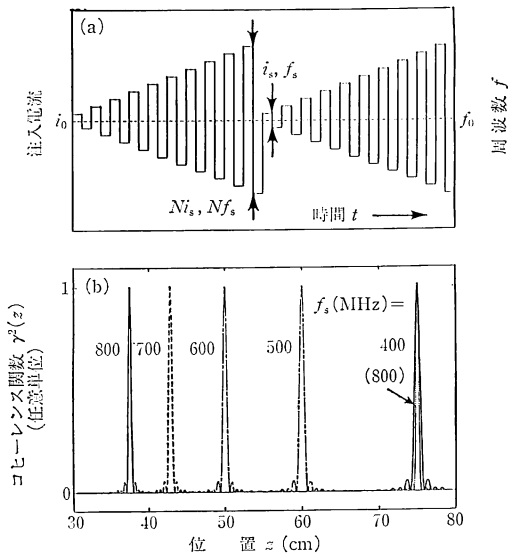


図 13 半導体レーザーの発振周波数の制御波形 (a)と、合成されるコヒーレンス関数形状 (b)⁶⁰⁻⁶²⁾

雑・高価になる^{55,57)}、光源の変調特性などによって制約を受ける⁵⁷⁾、可動部分が存在する^{58,59)}、といった問題点があった。

筆者らは最近、半導体レーザーの直接周波数変調特性を利用して光源のコヒーレンス関数の合成が可能であることを見いだした。そして、これを活用して高分解能なりフレクトメトリーを実現する新しい手法 optical coherence domain reflectometry by synthesis of coherence function (OCDR 法) を提案し、理論および基礎実験による検討を進めている⁶⁰⁻⁶⁴⁾。OCDR 法は、高分解能、機械的可動部分が存在しない、数値処理が不要、といった特長を持つ。

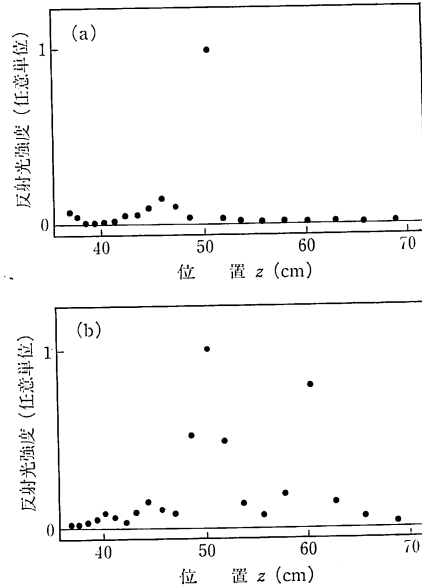


図 14 光波コヒーレンス関数の合成によるリフレクトメトリーによって得られた反射光分布⁶²⁾
(a) 50 cm の位置に 1% 反射鏡, (b) 50 cm と 60 cm の位置に 1% 反射鏡

図 12 は、OCDR 法の基本構成図である⁶⁰⁻⁶²⁾。被測定光回路からの反射・散乱光を中間周波数 f のヘテロダイン干渉成分として検出する。ここで、半導体レーザーの発振周波数を図 13 (a) のような波形で変化させると、時間平均的には同図 (b) のようなデルタ関数的なコヒーレンス関数が得られる。すなわち、特定の位置からの反射光とだけ干渉が生じることになる。図示のように、変調波形の振幅 f_s を変えるだけでこのデルタ関数の位置の掃引ができ、反射光分布が直接測定される⁶⁰⁻⁶²⁾。

1% 反射鏡を 50 cm の位置に置いた場合と、50 cm および 60 cm の位置に置いた場合の反射光分布の測定結果を図 14 に示す⁶²⁾。理論分解能 7 mm に対して約 10 mm が得られた。現在、性能劣化要因の把握と対策の研究とを進めている⁶⁴⁾。分解能は光源の周波数掃引幅で決り、直接周波数変調特性に優れた多電極 DFB レーザーを用いればサブミリメートルの分解能が達成できることが計算されている⁶⁰⁻⁶⁴⁾。

7. ま と め

3 回にわたり、単一モードファイバ型光デバイスとその応用について紹介した。光ファイバカプラーを中心に、これらデバイスは、光システムの構成上重要な役割を果している。単一モードファイバコネクタとの組合せ

により、実験系の構成が容易になってきたほか、融着技術の進歩はこれらデバイスを用いた実用システムを可能にしている。

今後、さらに多くのデバイスが考案されよう。とくに、Er ドープファイバを活用して、単に増幅器にとどまらず、さまざまな能動型光デバイスの実現が可能と思われる。導波路型光デバイスとの併用をも図ることで、新しい機能を持った光システムの登場に期待したい。

文 献

- 1) 保立和夫：“光ファイバとその応用—Ⅷ：ファイバ応用部品(1)—単一モードファイバ型光デバイス”，光学，**19** (1990) 386-396.
- 2) 保立和夫：“光ファイバとその応用—Ⅸ：ファイバ応用部品(2)—光ファイバジャイロへの応用”，光学，**19** (1990) 472-480.
- 3) 大越孝敬，西原 浩，岡本勝就，久間和夫，大津元一，保立和夫：光ファイバセンサ（オーム社，東京，1986）.
- 4) D. A. Jackson, R. Priest, A. Dandridge and A. B. Tveten: Elimination of drift in a single-mode optical fiber interferometer using a piezoelectrically stretched coiled fiber,” Appl. Opt., **19** (1980) 2926-2929.
- 5) K. Hotate, I. Sagehashi and N. Niwa: “Phase-nulling optical-fiber sensor by direct frequency modulation of laser diode,” Int. Conf. on Integrated Optics and Optical Fiber Commun. (IEICE-J, Tokyo, 1983) pp. 280-281.
- 6) A. Dandridge and A. B. Tveten: “Phase compensation in interferometric fiber-optic sensors,” Opt. Lett., **7** (1982) 279-281.
- 7) K. Hotate and Der-Tsair Jong: “Quasiheterodyne optical fiber sensor with automated adjustment of the driving wave parameter,” Appl. Opt., **26** (1987) 2956-2961.
- 8) K. P. Koo, A. B. Tveten and A. Dandridge: “Passive stabilization scheme for fiber interferometers using (3×3) fiber directional couplers,” Appl. Phys. Lett., **41** (1982) 616-618.
- 9) T. Okoshi and K. Kikuchi: *Coherent Optical Fiber Communications* (KTK Scientific Publishers, 1988).
- 10) A. W. Davis, M. J. Pettitt, J. P. King and S. Wright: “Phase diversity techniques for coherent optical receivers,” J. Lightwave Technol., **LT-5** (1987) 561-572.
- 11) L. G. Kazovsky: “Phase- and polarization-diversity coherent optical techniques,” J. Lightwave Technol., **LT-7** (1989) 279-292.
- 12) G. A. Berenbrock and B. Schlemmer: “Active controlled fiber optical 90° hybrid for coherent communications,” IEEE Photonics Tech. Lett., **1** (1989) 86-87.
- 13) L. G. Kazovsky, L. Curtis, W. C. Young and N. K. Cheung: “All-fiber 90° optical hybrid for coherent communications,” Appl. Opt., **26** (1987) 437-439.
- 14) K. Emura, R. S. Vodhanel, R. Welter and W. B. Sessa: “5 Gbit/s optical phase diversity homodyne detection experiment,” Electron. Lett., **25** (1989) 400-401.
- 15) J. M. Kahn, A. H. Gnauck, J. J. Veselka, S. K. Korotky and B. L. Kasper: “4 Gbit/s PSK homodyne transmission system using phase-locked semiconductor lasers,” Optical Fiber Communication Conf. (OSA/IEEE, San Francisco, 1990) PD 10.
- 16) T. Okoshi and S. Yamashita: “Double-stage phase-diversity optical receiver: Analysis and experimental confirmation of the principle,” J. Lightwave Technol., **LT-8** (1990) 376-384.
- 17) A. D. Kersey and A. Dandridge: “Distributed and multiplexed fiber-optic sensors,” Int. Conf. on Optical Fiber Sensors (OSA/IEEE, New Orleans, 1988) pp. 60-71.
- 18) R. Kist: “Fiber-optic sensors for networks,” Int. Conf. on Optical Fiber Sensors (IEICE-J, Tokyo, 1986) pp. 209-225.
- 19) 田井修市，高橋正信，久間和生，浜中宏一：“分布形光ファイバセンサ”，計測と制御，**26** (1987) 331-336.
- 20) 保立和夫：“分布型・準分布型光センシング技術の進歩”，平成元年電気学会全国大会講演論文集，**4** (1989) S. 6-6.
- 21) M. Tateda and T. Horiguchi: “Advances in optical time-domain reflectometry,” J. Lightwave Technol., **LT-7** (1989) 1217-1224.
- 22) A. G. Hartog and D. N. Payne: “Remote measurement of temperature distribution using an optical fibre,” European Conf. on Optical Communication (Cannes, 1982) pp. 215-220.
- 23) T. Shiota: “Fiber optic temperature distribution sensors,” Sino-Japanese Symp. on Optical Fiber Sensors (Beijing, 1988) pp. 31-36.
- 24) J. P. Dakin, D. J. Pratt, G. W. Bibby and J. N. Ross: “Distributed antistokes ratio thermometry,” Int. Conf. on Optical Fiber Sensors (OSA/IEEE, San Diego, 1985) PDS 3.
- 25) J. P. Dakin, D. J. Pratt, G. W. Bibby and J. N. Ross: “Temperature distribution measurement using Raman ratio thermometry,” Proc. SPIE, Fiber Optic and Laser Sensors III, **566** (1985) 249-256.
- 26) J. P. Dakin, D. J. Pratt, G. W. Bibby and J. N. Ross: “Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector,” Electron. Lett., **21** (1989) 569-570.
- 27) K. Ogawa, Y. Ozawa, H. Kawakami, T. Tsutsui and S. Yamamoto: “A fiber-optic distributed temperature sensor with high distance resolution,” Int. Conf. on Optical Fiber Sensors (Springer, Paris, 1989) pp. 544-551.
- 28) Y. Tanabe, A. Takaba, K. Ikawa and N. Bando: “An improvement of the accuracy in the distributed fiber temperature measurement using Raman back-scattering,” Int. Conf. on Optical Fiber Sensors (Springer, Paris, 1989) pp. 537-543.
- 29) M. Tateda, T. Horiguchi, T. Kurashima and K. Ishihara: “First measurement of strain distribution along field-installed fibers using Brillouin spectroscopy,” Optical Fiber Communication Conference (OSA/IEEE, San Francisco, 1990) PD 15.
- 30) 種子 彰，小菅 卓，大野 豊：“分布系光ファイバ過温度警報センサ”，光ファイバセンサシンポジウム'85 (第2回光ファイバセンサワークショップ) 講演論文集 (1985) pp. 119-126.
- 31) 種子 彰，小菅 卓，飛田雄二：“油漏洩検知用分布系光ファイバセンサシステム”，第3回光波センシング技術研究会講演論文集 (1989) pp. 171-178.

- 32) A. C. Kersey, A. Dandridge and A. B. Tveten: "Time-division multiplexing of interferometric fiber sensors using passive phase-generated carrier interrogation," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 775-777.
- 33) J. L. Brooks, B. Moslehi, B. Y. Kim and H. J. Shaw: "Time-domain addressing of remote fiber-optic interferometric sensor arrays," *J. Lightwave Technol.*, **LT-5** (1987) 1014-1023.
- 34) A. D. Kersey and A. Dandridge: "Ten-element time-division multiplexed interferometric fiber sensor array," *Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Springer, Paris, 1989) pp. 486-490.
- 35) J. L. Brooks, R. H. Wentworth, R. C. Youngquist, M. Tur, B. Y. Kim and H. J. Shaw: "Coherence multiplexing of fiber-optic interferometric sensors," *J. Lightwave Technol.*, **LT-3** (1985) 1062-1072.
- 36) D. T. Jong and K. Hotate: "Frequency division multiplexing of optical fiber sensors using an optical delay loop with a frequency shifter," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 1239-1297.
- 37) D. T. Jong and K. Hotate: "Optical fiber interferometer sensor with immunity from environmental disturbance induced in the lead-fiber," *Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Springer, Paris, 1989) pp. 313-320.
- 38) T. Okoshi, S. Ryu and K. Kikuchi: "Polarization-diversity receiver for heterodyne/coherent optical fiber communications," *Int. Conf. Integrated Optics and Optical Fiber Commun.* (IEICE-J, Tokyo, 1983) 30 C 3-2.
- 39) T. Okoshi and Y. H. Cheng: "Four-port homodyne receiver for optical fiber communications comprising phase and polarization diversities," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 377-378.
- 40) T. Okoshi: "Polarization-state control schemes for heterodyne or homodyne optical fiber communications," *J. Lightwave Technol.*, **LT-3** (1985) 1232-1237.
- 41) N. G. Walker and G. R. Walker: "Polarization control for coherent communications," *J. Lightwave Technol.*, **LT-8** (1990) 438-458.
- 42) R. Noe, H. Heidrich and D. Hoffmann: "Endless polarization control systems for coherent optics," *J. Lightwave Technol.*, **LT-6** (1988) 1199-1208.
- 43) V. Napsab and T. Okoshi: "Polarization recombining: A new automatic polarization control scheme for heterodyne or homodyne optical receivers," *J. Opt. Commun.*, **9** (1988) 102-107.
- 44) K. Liu, M. Dignonnet, K. Fesler, B. Y. Kim and H. J. Shaw: "Broadband diode-pumped fiber laser," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 838-840.
- 45) 中沢正隆: "光ファイバによる光増幅," *光学*, **18** (1989) 291-296.
- 46) S. Saito, T. Imai, T. Sugie, N. Ohkawa, Y. Ichihashi and T. Ito: "An over 2,200 km coherent transmission experiment at 2.5 Gbit/s using erbium-doped-fiber amplifiers," *Optical Fiber Communication Conference* (OSA/IEEE, San Francisco, 1990) PD 2-1.
- 47) E. Desurvire and J. R. Simpson: "Amplification of spontaneous emission in erbium-doped single-mode fibers," *J. Lightwave Technol.*, **LT-7** (1989) 835-845.
- 48) P. F. Wysocki, M. J. F. Dignonnet and B. Y. Kim: "Spectral characteristics of high power 1.5 μm broadband superluminescent fiber sources," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, **2** (1990) 178-180.
- 49) K. Iwatsuki: "Er-doped superfluorescent fiber laser pumped by 1.48 μm laser diode," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, **2** (1990) 237-238.
- 50) H. Po, E. Snitzer, R. Tumminelli, L. Zenteno, F. Hakimi, N. M. Cho and T. Haw: "Double clad high brightness Nd fiber laser pumped by GaAlAs phased array," *Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (OSA/IEEE, New Orleans, 1988) PD 7.
- 51) I. M. Jauncey, L. Reekie, J. E. Townsend and D. N. Payne: "Single-longitudinal-mode operation of an Nd³⁺-doped fibre laser," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 24-26.
- 52) K. Iwatsuki, A. Takada, K. Hagimoto, M. Saruwatari, Y. Kimura and M. Shimizu: "Er³⁺-doped fiber-ring-laser with less than 10 kHz linewidth," *Optical Fiber Communication Conf.* (OSA/IEEE, Hoeston, 1989) PD 5.
- 53) P. R. Morkel, G. Cowle and D. N. Payne: "Single-frequency operation of a travelling wave erbium fiber using laser," *Optical Fiber Communication Conf.* (OSA/IEEE, Hoeston, 1989) PD 18.
- 54) H. H. Gilgen, R. P. Novak, R. P. Salathe, W. Hodel and P. Beaud: "Submillimeter optical reflectometry," *J. Lightwave Technol.*, **LT-7** (1989) 1225-1233.
- 55) P. Beaud, J. Schutz, W. Hodel, H. P. Weber, H. H. Gilgen and R. P. Salathe: "Optical reflectometry with micrometer resolution for the investigation of integrated optical devices," *IEEE J. Quantum Electron.*, **25** (1989) 755-759.
- 56) M. Nazarathy and D. W. Dolf: "Optical synchronous detection with coded modulators applied to optical frequency domain reflectometry," *Optical Fiber Communication Conf.* (OSA/IEEE, Hoeston, 1989) THF 3.
- 57) H. Barfuss and E. Brinkmeyer: "Modified optical frequency domain reflectometry with high spatial resolution for components of integrated optic systems," *J. Lightwave Technol.*, **LT-7** (1989) 3-10.
- 58) R. C. Youngquist, S. Carr and D. E. N. Davies: "Optical coherence-domain reflectometry: a new optical evaluation technique," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 158-160.
- 59) 高田和正, 高戸範夫, 野田壽一, 内田直也: "光導波路評価用干渉型後方散乱測定系," *光学*, **18** (1989) 618-626.
- 60) 保立和夫, 鎌谷 修: "光波コヒーレンス制御によるリフレクトメトリー," *電子情報通信学会光・量子エレクトロニクス研究会*, OQE 89-53 (1989) pp. 9-16.
- 61) K. Hotate and O. Kamatani: "Reflectometry with high spatial resolution and no moving part by means of source-coherence modulation," *Int. Conf. on Optical Fiber Sensors* (Springer, Paris, 1989) pp. 64-70.
- 62) K. Hotate and O. Kamatani: "Reflectometry by means of optical-coherence modulation," *Electron. Lett.*, **25** (1989) 1503-1505.
- 63) K. Hotate and O. Kamatani: "Optical signal processing for reflectometry with high spatial-resolution by synthesis of coherence function," *Topical Meeting on Optical Computing* (JSAP, Kobe, 1990) 10 H.3.
- 64) K. Hotate and O. Kamatani: "Optical coherence domain reflectometry by synthesis of coherence function," *Optoelectronics Conference* (IEICE-J, Chiba, 1990) pp. 168-169, Invited.