

光周波数掃引法による光ファイバ通信網および光回路の 非破壊的内部診断・特性評価システムの開発

飯山 宏一 金沢大学工学部電気電子システム工学科
高宮 三郎 金沢大学工学部電気電子システム工学科

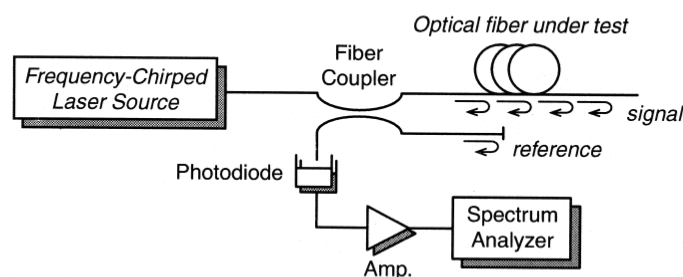
1. 研究調査の目的

高度情報社会において、ますます大容量・超高速の情報伝送の重要性が高まっており、例えば、昨今のマルチメディア構想は、情報の受け手側として一般加入家庭、すなわち、個人レベルまでを対象にしている。このような構想に対処できるものに波長多重（WDM）光通信システムや光交換機などによる高度な光ネットワークがあり、21世紀初頭までに加入者宅への光ファイバ通信網を構築し、双方向通信や情報の提供が計画されている（Fiber To The Home計画）。この計画が実用化されるときには、膨大な通信網や宅内機器間の相互接続状態の監視が必要不可欠となる。

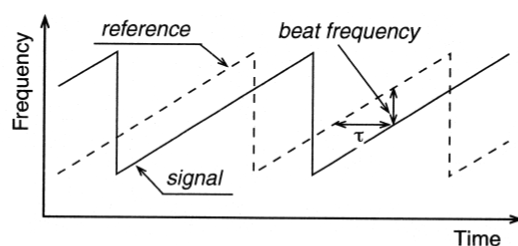
一方、上記のような光通信の社会的要請に伴って、光ファイバ、光ファイバ増幅器や光導波路などの研究・開発が盛んになり、その内部診断および特性評価が重要な問題となってきている。内部診断や特性評価のためには、長尺の光ファイバに対して長い測定距離（100 km以上）と空間分解能1 m以下、光ファイバ増幅器に対しては空間分解能10 cm以下、光導波路に対しては空間分解能1 mm以下の性能が要求される。

本研究調査では、光ファイバ、光ファイバ増幅器および光導波路の内部診断・特性評価のためのシステムを構成することを目的とする。従来は光パルスを入射し、光ファイバ内から反射される光を時間軸上で測定する方法（Optical Time Domain Reflectometry：OTDRという）が使われているが、本研究ではレーザ光源の光周波数を掃引し、周波数軸上で測定する方法（Optical Frequency Domain Reflectometry（OFDR）あるいはFrequency-Modulated Continuous-Wave（FMCW）リフレクトメトリという）を構成する。OFDRでは原理的に1 mm程度の空間分解能が比較的容易に得られるとともに測定距離も10 km以上が得られるので、小型の光導波路や光ファイバ増幅器はもちろん、長尺の光ファイバの内部診断・特性評価に有効である。

2. 研究調査の方法



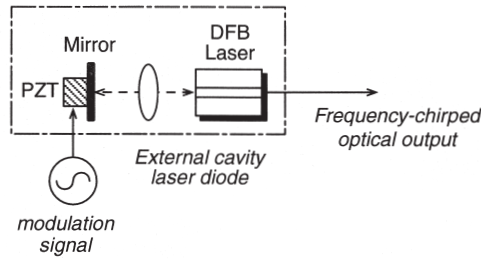
(a) システム構成図



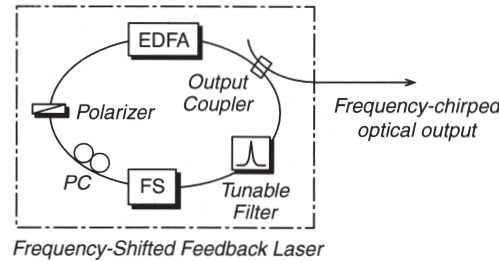
(b) 光周波数の変化

図1 構成するDFDRのシステム構成図と光周波数の変化

本研究調査で構成するシステムは図1に示すように、光周波数が掃引されているレーザを光源に用いたマイケルソン干渉計であり、干渉計の片方の光路中に測定対象の光ファイバが接続されている。光ファイバ内から反射する光（信号光）と干渉計の他方の光路で反射する光（参照光）とのビート信号を測定すると、ビート信号は信号光と参照光との光路長差に比例するビート周波数を持つことから、ビート信号のスペクトル成分（ビートスペクトルという）を測定することにより、光ファイバの長さ方向の特性評価が可能である。光ファイバや光導波路の特性評価においては、空間分解能が高いこと、測定可能距離が長いこと、感度が良いことなどの性能が要求される。本研究で構成するOFDRにおいては、これらの性能を満足するためには、(1) レーザ光源の光周波数掃引の線形性を高くすること、(2) 光周波数掃引幅を大きくすること、(3) 光源のスペクトル広がりを狭くすること、の3つを実現することが重要である。そこで本研究調査では、図2に示す2種類の光源を用いてシステム構築を行い、以下の項目について研究を行った。



(a) 外部共振器構造の半導体レーザの構成図



(b) 周波数シフト帰還型光ファイバレーザの構成図
(PC：偏波面コントローラ、FS：光周波数シフタ)

図2 OFDRの光源として用いたレーザー光源の構成図

構成するレーザ光源

- (a) 外部共振器構造の半導体レーザ（外部共振器LD）
- (b) 周波数シフト帰還型光ファイバレーザ（FSFレーザ）

実験項目

- 長尺光ファイバの特性評価
- 光ファイバ増幅器の利得分布の評価
- 空間分解能向上のためのビート信号測定方法の改良
- 光ファイバの波長分散の評価

3. 研究調査の結果

(a) 外部共振器LDを用いた構成

(a-1) 長尺光ファイバの特性評価

波長1552 nmの分布帰還型半導体レーザ（DFBレーザ）の外側に鏡を設置して外部共振器を構成し、レーザのスペクトル線幅を4 MHzから200 kHzに狭窄化した。外部共振器LDにおいて光周波数を掃引するためには、レーザの注入電流を変調する方法と、外部共振器長を変調する方法がある。前者は簡便であるが、レーザの動作点変動による光周波数の離散的な跳躍（モードホッピングという）が生じるため適切ではない。一方、後者は光周波数掃引を線形に掃引することは非常に困難であるが、モードホッピングを生じない利点がある。そこで本研究調査では、後者の方法を採用した。外部鏡に圧電振動子（PZT）を接着し、PZTに交流信号を印加することにより外部鏡の位置を波長程度変化させ、光周波数を掃引した。なお、この方法では光周波数掃引は非線形になり空間分解能の劣化を生じるので、光周波数掃引が線形と見なせる部分のビート信号のみを用いて測定を行った。本システムでは10 m～10 km程度の長さの光ファイバの特性評価を目的としている。

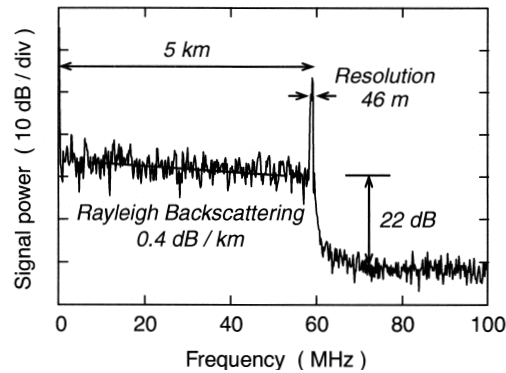


図3 5 km長の光ファイバの特性評価結果

図3に、5 km長の光ファイバに対する測定結果を示す。60 MHzに現れているピークは5 km遠方の出射端でのフレネル反射であり、60 MHz以下の周波数領域での右下がりの信号は光ファイバ内部の後方レイリー散乱光である。後方レイリー散乱光も感度良く測定できており、その傾きから光ファイバの損失として0.4 dB/kmと評価できる。この損失値はOTDRによる測定結果と同じであり、光ファイバの損失値の評価が可能であることがわかる。また、空間分解能は5 km遠方において46 mであることがわかった。理論的考察から、この空間分解能は光周波数の掃引幅およびレーザのスペクトル線幅で制限されており、レーザのスペクトル線幅をより狭窄化し、光周波数掃引を線形かつ掃引幅を大きくすることにより、空間分解能を向上させることができる。

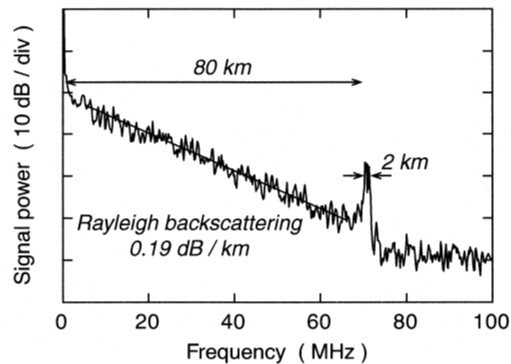


図4 80 km長光ファイバに対する特性評価結果

図4は80 km長の光ファイバに対する測定結果である。80 km遠方での空間分解能は2 kmと悪いが、これは光周波数掃引の非線形性の影響である。この光ファイバの損失は0.19 dB/kmと評価され、OTDRでの測定結果と一致している。以上の結果より、長尺の光ファイバの特性評価に対しては、空間分解能はOTDRより悪いが、測定可能距離や損失評価についてはOTDRと同等の性能であることがわかった。本システムの利点としては、レーザ光はCWであり光出力も数mW程度であるので、被測定光ファイバ内での誘導ブリルアン散乱や自己位相変調などの非線形性の影響を避けることができること、空間分解能が高くなるとスペクトラムアナライザを帯域幅が狭くすることができるので雑音レベルが低減され感度が向上することなどがある。

(a-2) 光ファイバ増幅器の利得分布の評価

外部共振器LD（波長1552 nm）を光源に用いて、エルビウムドープ光ファイバ増幅器（EDFA）の利得分布の測定を行った。EDFAの長さは10～100 mである。本実験では、測定距離10 mにおいて空間分解能30 cm、100 m遠方において空間分解能2 mが得られ、30 m長および90 m長のEDFAの利得分布を測定した。

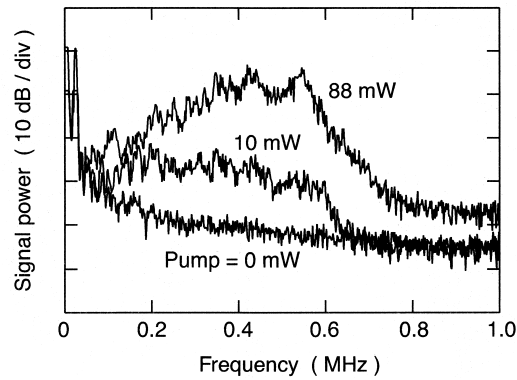


図5 30 m長のEDFAの利得分布測定結果

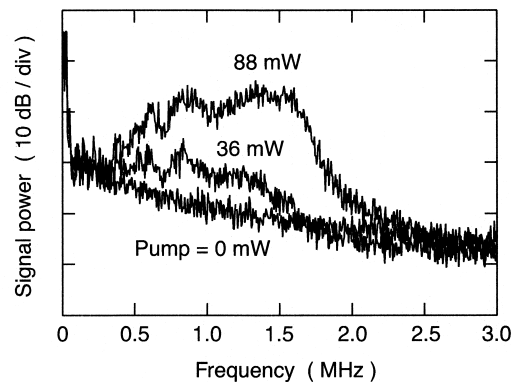


図6 90 m長のEDFAの利得分布測定結果

図5に30 m長のEDFA (Er濃度380 ppm、Al濃度1.1 wt%) に対する測定結果を、図6に90 m長のEDFA (Er濃度120 ppm、Al濃度0wt%) に対する測定結果を示す。励起光には波長1480 nmの半導体レーザを用い、信号光は外部共振器LDを用いた。なお、EDFA出射端のフレネル反射は抑えてある。励起光パワーを増加させると測定される後方レイリー散乱光成分の強度が大きくなることから、利得が大きくなることがわかる。また、後方レイリー散乱光強度は周波数(すなわち、距離)に対して飽和する傾向にあることから、EDFAの長さ方向には利得飽和が生じていることがわかる。このことから、最適なEDFAの長さを決定することも可能である。測定結果から得られるEDFA全体としての利得は従来の光スペクトラムアナライザによる測定結果と一致しており、本システムがEDFAの利得分布を非破壊的に測定できる有効な方法であることが確認できた。

(a-3) 空間分解能向上のためのビート信号測定方法の改良

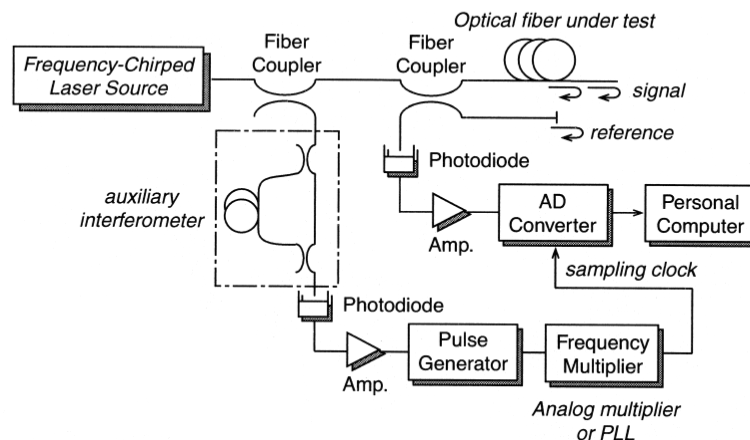


図7 空間分解能向上のためのビート信号測定法(同期サンプリング法)

OFDRにおいては、光周波数掃引の非線形性が空間分解能劣化の原因となるため、光周波数掃引を完全に線形化する必要がある。しかし、半導体レーザを光源に用いる場合には光周波数掃引を完全に線形化することは非常に困難である。そこで、図7に示すシステムを構成した。すなわち、測定用の干渉計と別の補助干渉計（マッハ・ツェンダ干渉計）を構成し、この補助干渉計のビート信号からデータ取り込みのためのサンプリング信号を作り、測定用干渉計のビート信号をサンプリングしてコンピュータに取り込み、取り込んだデータをFFTにより周波数解析する。この方法を同期サンプリング方式と呼ぶ。サンプリング信号とビート信号ともに光周波数掃引の非線形性の影響を等しく含んでいるため、サンプリングされたビート信号からは光周波数掃引の非線形性の影響が除去され、空間分解能が向上する。しかし、この方法ではサンプリング定理を満たすため、測定可能距離は補助干渉計の光路長差の1/4以下に制限されるという問題点がある。そこで、図7に示すようにサンプリング信号を電子回路を用いて通倍することにより、測定可能距離を延長するシステムを開発した。周波数通倍回路はPLLを用いた回路およびアナログ掛算器を用いた回路の2種類を構成した。PLLを用いた回路は構成が簡単である利点がある一方、光周波数掃引の非線形性により補助干渉計の瞬時ビート周波数は大きく変動するのでロックレンジから外れてしまう問題点があることがわかった。一方、アナログ掛算器を用いた回路は構成が複雑であるが、瞬時ビート周波数が大きく変動しているときにも有効であることがわかった。

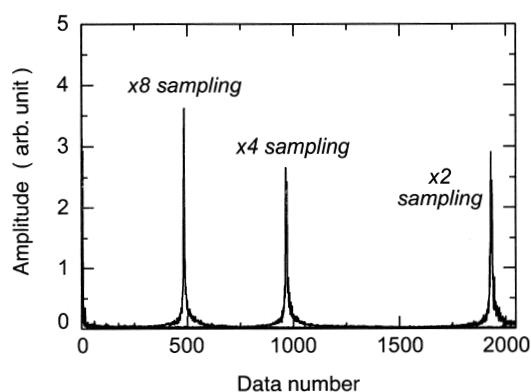


図8 同期サンプリング法によるビートスペクトル測定結果

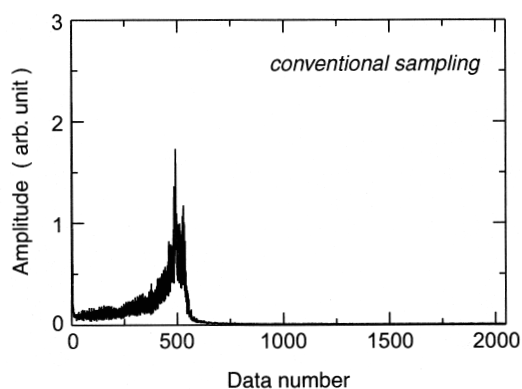


図9 同期サンプリング法を用いない従来法による結果（図8の8倍サンプリング時に相当）

アナログ掛算器を用いた周波数通倍器を用いて得られた結果を図8に示す。補助干渉計の光ファイバ長は240 cm、測定対象の光ファイバ長は120 cmであるので、サンプリング信号を2倍通倍した場合に初めてサンプリング定理を満たす。サンプリング周波数を通倍することによりビート信号がピークとなる横軸の値（ビート周波数に相当）が低くなることから、測定可能距離が延長されることがわかる。同図より、サンプリング周波数を8倍通倍することにより、測定可能距離5 m、空間分解能1.5 cm程度が得られた。また、図9は通常のサンプリング方法による測定結果であり、図8の8倍通倍時と同じビート周波数を持つようにサンプリング信号を設定している。図8と図9を比べると、同期サンプリング方式により空間分解能が大きく向上しており、本方式が大変有効であることがわかる。

(b) FFSレーザを用いた構成

FFSレーザとは図2(b)に示すように、光ファイバによるレーザ共振器内に光周波数シフタ (FS) を組み込んだレーザ発振器のことであり、光周波数が高速かつ線形に掃引されるという特徴がある。それゆえ、OFDRの光源に最適と考えられる。光通信の波長帯で発振するFFSレーザを構成するため、利得媒体にはEDFAを用いた。本研究調査で構成したFFSレーザは共振器長は35 mであるので、共振器縦モード間隔 (Free Spectral Range : FSR) は5.9 MHzである。また、光スペクトラムアナライザで測定した光周波数掃引幅は約20 GHzであったので、約3,400本の縦モードが同時に周波数掃引されていることになる。

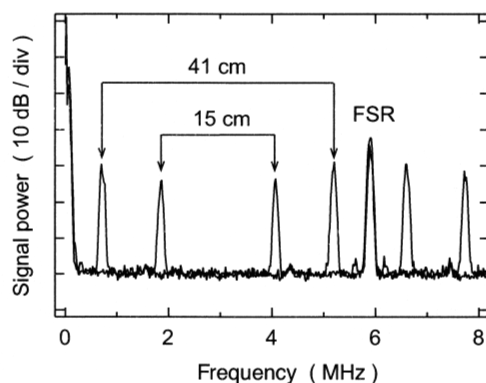


図10 FFSレーザによる短尺光ファイバの測定結果

まず、短尺の光ファイバを測定対象として測定を行った。その結果を図10に示す。FSR内に2本のピーク信号が観測されること、光ファイバ長が長くなると2本のピーク信号が近づくことがわかる。この結果より、分布的に測定できる距離はピーク周波数がFSRの半分になる距離で定義され、本研究では1 m程度であることがわかる。また、外部共振器LDを光源に用いたOFDRと比べると感度は30 dB程度悪く、光ファイバの後方レイリー散乱光は検出できなかった。感度劣化の原因としては、FFSレーザは複数の縦モードで同時に発振しているため、縦モード間の位相が完全に同相になっていないためと考えている。

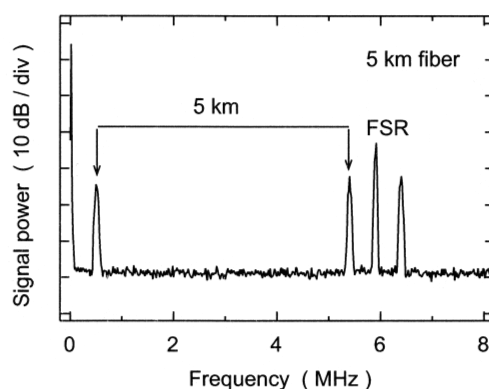


図11 FFSレーザによる5 km長の光ファイバの測定結果

図11は5 km長の光ファイバに対する測定結果である。この場合にも低周波数領域にピークスペクトルが現れることがわかる。このピークスペクトルは異なる縦モード間でのピークにより生じたものであるので、正確な光ファイバ長を求めるには、いくつ異なる縦モード間のピークであるかを知る必要がある。以上の結果より、長尺の光ファイバの分布的特性評価は不可能であるが、接続点や出射端の場所を検出する目的には十分使用できるといえる。空間分解能は、FFSレーザの光周波数掃引の優れた線形性により、10 km程度以下の測定範囲においては1 cm、80 km遠方においては10 cmであった。80 km遠方においては、外部環境擾乱により光ファイバ長あるいは光ファイバの屈折率が揺らぎ、その結果ピーク周波数が揺らぐことにより空間分解能が劣化していると考えている。

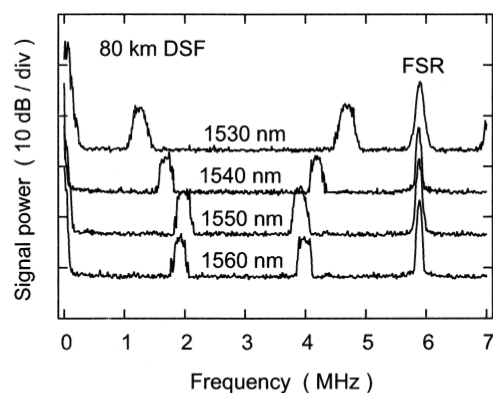


図12 FSFレーザによる80km長DSFのビートスペクトル

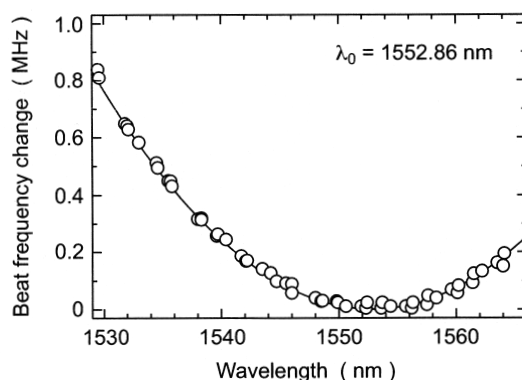


図13 80km長DSFに対するビート周波数の波長依存性

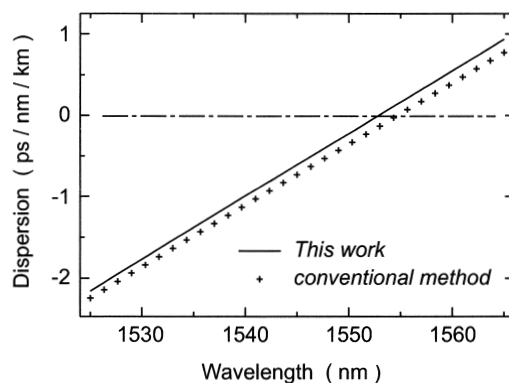


図14 80km長DSFの波長分散評価結果

さて、長尺の光ファイバに対する実験において、FSFレーザの発振波長を変化させると光ファイバ出射端のフレネル反射によるビート周波数が変化することを発見した。これは、光ファイバの波長分散により光波の伝搬時間は波長により異なり、光波が感じる光ファイバ長が異なるためである。従来のOTDRでは空間分解能は数mであるので波長による伝搬時間差を測定することができないが、本システムでは数km～数10 kmの測定範囲においても数cmという極めて高い空間分解能を持つという特徴により初めて測定可能になったものである。この現象を利用して、光ファイバの波長分散および零分散波長が評価可能であると考えられる。図12に、80 km長の分散シフト光ファイバ（Dispersion Shifted Fiber：DSF）に対するビート信号の測定結果を示す。波長によりビート周波数が変化していることがわかる。図13は波長に対するビート周波数の変化をプロットした結果であり、○は測定結果、実線は測定結果を2次関数でフィッティングした結果である。ビート周波数は波長に対して2次関数的に変化することがわかる。2次関数が頂点となる波長が零分散波長であり、80 km長のDSFの零分散波長 λ_0 は1552.86 nmであることがわかる。フィッティングした2次関数を波長に対して微分し、さらに、ビート周

波数変化量を伝搬時間の変化量に変換することにより、波長分散特性を求めることができる。その結果を図14に示す。実線は本システムでの結果、+は従来から用いられている方法での結果である。両者は良く一致しており、FSFレーザを用いたOFDRにより、光ファイバの波長分散特性が評価できることがわかった。

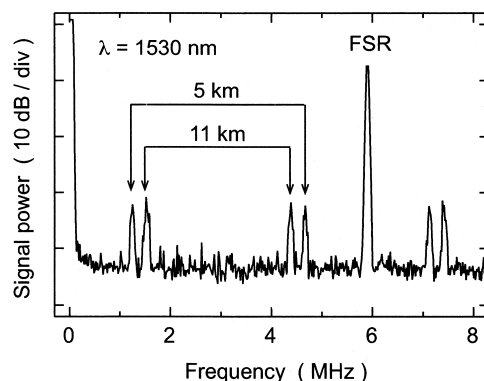


図15 接続された2本の光ファイバに対するビートスペクトル

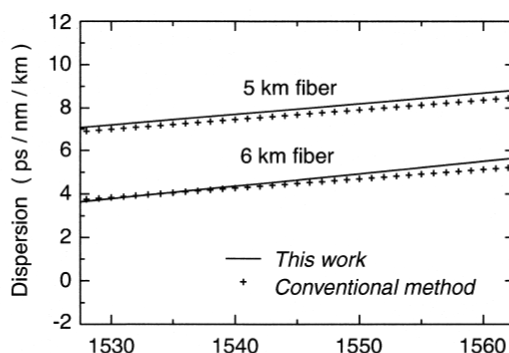


図16 接続された2本の光ファイバに対する波長分散評価結果

次に、5 kmの光ファイバと6 kmの光ファイバをコネクタ接続して測定対象に用いたところ、図15に示すように、コネクタ接続点および出射端でのフレネル反射が同時に検出された。この2つの反射によるビート周波数はFSFレーザの発振波長に依存して同時に変化することがわかった。2つの反射によるビート周波数の波長依存性を測定することにより、2本の光ファイバの各々の波長分散が同時に評価できる。波長分散の評価結果を図16に示す。実線は本研究での結果、+は従来法による結果である。この結果から、接続された2本の光ファイバの各々の波長分散が同時に精度良く評価できることがわかる。

4. 研究調査のまとめ

本研究調査では、光ファイバや光導波路の非破壊的特性評価を目的として、光周波数が掃引されているレーザ光源を用いたOFDRを構成した。レーザ光源には外部共振器LDとFSFレーザの2種類を用いた。その結果、長尺の光ファイバの分布的特性評価には外部共振器LDを用いたOFDRが適しており、光ファイバの波長分散測定や光導波路における欠陥検出などにはFSFレーザを用いたOFDRが適しているといえる。本研究調査で構成したシステムは光ファイバや光導波路の内部診断・特性評価法として新しい方法を提供するものであり、光ネットワークの発展および実用に大いに貢献するものと考えられる。また、OTDRとOFDRとを有機的に組み合わせたシステムを構築も可能であり、ますますの発展が考えられる。

< 発 表 資 料 >

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
周波数シフト帰還型ファイバレーザによる長尺光ファイバの群速度分散測定	平成11年電気関係学会北陸支部連合大会、D-32,富山大学	1999年10月
Phase-decorrelated FMCW reflectometry for long optical fiber characterization by using a laser diode with modulated external cavity	IEICE Transactions on Electronics, vol.E83-C,no.3,pp.428-434	2000年3月
周波数シフト帰還型光ファイバレーザによる光ファイバの群速度分散測定	2000年電子情報通信学会総合大会、B-13-17、広島大学	2000年3月
同期サンプリングFMCWリフレクトメトリの測定可能距離延長	2000年電子情報通信学会総合大会、C-3-149,広島大学	2000年3月
波長可変周波数シフト帰還型光ファイバレーザによる光ファイバの波長分散測定	電子情報通信レーザ・量子エレクトロニクス研究会、LQE2000-13、福井大学	2000年5月
A novel method for measuring chromatic dispersion of long optical fibers by means of high resolution optical ranging system using a frequency-shifted feedback laser	Symposium on Optical Fiber Measurements,Boulder Colorado (to be presented)	2000年9月