

## 「システムフォトニクス」でひとりごと

豊田工業大学 学長  
保立和夫 HOTATE, Kazuo

筆者は、子供の頃から模型工作好きで、中学の頃はラジコン飛行機を作り、飛ばしては壊していました。模型がものづくりへの興味を育て、大学では飛行機か送受信機を作ろうと思い、結局、電子工学を選びました。博士課程修了時に母校で教員に採用して頂き、定年まで勤めて、5年前から豊田工業大学に勤務しています。電気系教員になって43年経ちました。

さて、東大の電子工学科に進み、卒論では大越孝敬先生の研究室でホログラフィを研究しました。修士/博士課程では光ファイバを研究対象とし、単一モード光ファイバの屈折率分布を十分な空間分解能で非破壊測定する研究等をしました。光ファイバ側面からレーザー光を照射して得られる散乱パターンから屈折率分布が計算できるはず、というアイデアを大越先生から頂き、先輩の皆さんからのご支援も得て、散乱角の関数として測定した光パターンにハンケル変換を施すと屈折率分布が逆算できることを見出し、十分な分解能での分布形状測定に成功しました。

大越先生は「私達はエンジニアなのだから世の中に残る技術を作りたいね」と、独り言のように仰っていました。未熟な院生は、この技術は実用化できるのではと、期待した次第です。しかし、その夢は果たせませんでした。光ファイバ母材の屈折率分布が線引き後のそれと良く一致し、光ファイバを直接計る必要性は高くならなかったのです。技術の実用化には様々な条件が整合する必要があると、勉強になりました。

大越先生から、後になって、「君にあのテーマを出したとき、ちゃんと出来るかどうか心配だったのですよ」と言われました。新しいアイデアに挑戦するとはこういうことなのだと納得し、以来「大学では新しいことしか研究しない」が、私の口癖になりました。

博士課程を修了し、当時の東京大学宇宙航空研究所の専任講師になりました。この研究所のミッションは科学衛星の打ち上げです。人工衛星の慣性航法や姿勢制御に欠かせないセンサにジャイロがあります。当時は機械式ジャイロが主流でしたが、コマの軸受け精度や経年劣化を考えると、可動部分が皆無なジャイロが必要でした。

光ループを逆回りに伝搬する2光波間には、ループの慣性空間に対する回転角速度に比例した位相差が生じ、「サニャック効果 (Sagnac effect)」と呼ばれます。ただ、その感度は極微小です。1960年代初めにレーザーが登場すると、閉ループ中で逆回りに発振するレーザー光間に生じる光周波数差としてサニャック効果を高感度で測定できるリングレーザージャイロ (Ring Laser Gyro: RLG) が提案され、実用化が始まっていました。しかし、RLGでは低回転入力時に光周波数差がゼロに固定される現象が生じ、対策としてジャイロを回転振動させる必要がありました。無重力下で稼働させるには、この振動は致命的です。

筆者が宇宙航空研究所に着任する少し前、長尺な光ファイバをコイル状にして左右両回り光を伝搬させて両光間の位相差としてサニャック効果を測定する光ファイバジャイロ (Fiber Optic Gyro: FOG) の概念が提案されたところでした。「これなら新しいことができそうだ」と考え、FOGを最初の研究

テーマと致しました。

高感度ジャイロでは、 $\mu\text{rad}$ .オーダの位相変化を測定する必要があります。一方、光ファイバコイル中で生じる、偏波変動、非線形光学効果、レイリー散乱、地磁気によるファラデー効果、不均一な温度変化、等々が発生する雑音は、上記要求を数桁も上回っていました。当研究室では、地磁気によるファラデー効果が発生するドリフトの低減策を研究し、偏波維持光ファイバでコイルを作ってその振れを制御する、あるいは通常の光ファイバでも低コヒーレンス光源によるデポラライズ光を使うことで、本ドリフトの大幅低減が可能であることを示しました。

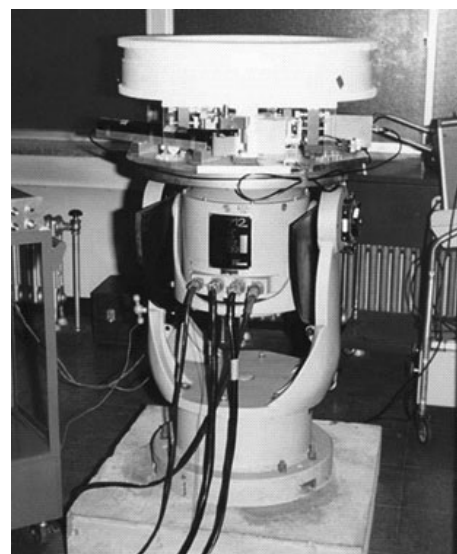
他の雑音要因に関しても、低コヒーレンス光源の利用、デポラライズ光の利用、光ファイバコイルの特殊な巻き方、等々の現実的な低減方法が世界中の研究者によって提案され、FOGの性能は桁違いに向上しました。FOGは、光源、受光器、光ファイバコイル、偏光子、デポラライザ、光位相変調器等々からなる光システムです。しかし、単なる光デバイスの組み合わせではありません。光デバイス機能や光の物理を熟知した上で、光波を巧みに制御するアイデアを想起することによって、驚くような機能・性能が実現されたのです。筆者は、このような研究領域を「システムフォトニクス (Systems Photonics)」と名付けました。

光ファイバジャイロはその後実用化が進み、航空機の慣性航法、人口衛星の航法・制御、人型ロボットの姿勢制御、アンテナ・カメラの安定機構等々に活用されました。初期のカーナビにも採用され、当職も我が家の車にFOG搭載カーナビを装備して、研究に携わったFOGを実際に使用できて嬉しく思ったことを覚えています。写真は、東京大学宇宙航空研究所（当時）で稼働させた、我が国初の光ファイバジャイロの実験系です。

筆者は、その後、本郷の工学部電子工学科に移籍しました。ここでは、何故か、工学系研究科長・工学部長になってしまいました。その職務のひとつとして、教養学部の1, 2年生に向けて学部紹介の講演をすることがありました。ある2年生から「理学部と工学部はどう違うのか」と問われて、「理学は真理と語らい、工学は社会と語らう」というフレーズを創りました。「工学には、成果を社会で役立てたいという意志がある」という意味です。

つづいて、全学の産学連携本部長を勤めました。大学での学術研究の成果として現れる斬新な発明は、社会をより大きく変革する可能性を有します。このような変革を「歩幅の広いイノベーション」と呼ぶことにしました。アカデミックフリーダムに支えられた研究者の自由な発想に基づく研究が、大学には求められています。

さて、研究のお話に戻りましょう。筆者は、FOGにつづき分布型センシングに興味を持っていました。まずは、独自の分布センシング原理を創りたいと思い、光波コヒーレンス関数の合成法 (Synthesis of Optical Coherence Function: SOCF) と名付けた手法を提案しました。この手法によれば、ある特定の光路差を持つ光波間でのみ干渉縞の鮮明度が1 (最大) となり、その他の場合には鮮明度を極めて低く抑えることが可能です。これによって、光ファイバや光導波路中の特別な位置からの反射光成分のみを選択的に測定できます。本システムでは、機械的可動部不要、取得データへの演算処理不要、空間分解能可変、といったユニークな機能が実現できました。このSOCF法を基盤に、光ファイバ中で生じるブリルアン散乱の分布測定システムを構築する研究を展開しました。本散乱光は入射光より約10GHz光周波数が低下し、その値は光ファイバの伸縮歪や温度で変化しますので、分布型歪・温度測定システムが実現できます。



我が国初の光ファイバジャイロの実験系。東京大学宇宙航空研究所にて (1980年)

誘導散乱を利用した「ブリルアン光相関領域解析法 (Brillouin Optical Correlation Domain Analysis: BOCDA)」と、自然散乱を利用した「ブリルアン光相関領域リフレクトメトリ (Brillouin Optical Correlation Domain Reflectometry: BOCDR)」という 2 つのシステム構成を提案・開発しました。このような分布型歪・温度センシングにより、ビル、橋脚・橋梁、航空機、パイプラインといった大型構造物に光ファイバを張り巡らせることで、構造物の健全性診断技術 (Structural Health Monitoring: SHM) が提供されます。これには「痛みの分かる材料・構造の為の光ファイバ神経網」という呼称を考えました。

ブリルアン散乱を分布測定する技術として、当時は、光パルスを入射し、後方散乱を時間分解測定する方法が主流でした。しかし、この基本システムでは、本散乱の本質的な特性により空間分解能は約 1m に制限されていました。これに対し、BOCDA 法や BOCDR 法はこの制限を受けず高分解能化が可能で、実際に 1.3mm の分解能を達成しました。これら手法では、分布測定の他に、光ファイバに沿って任意に選んだ複数の点でのみ計測できるユニークな機能も実現でき、「ランダムアクセス機能」と名付けました。また、開発した複数の雑音低減法を導入した BOCDR システムを構築して、5,280m 測定長にて 3.95cm の空間分解能での分布測定を実現し、測定レンジと分解能の比 134,000 を達成した他、温度と歪の同時・分離・分布計測法も提案・実証できました。

計測機器、土木建設、航空機産業等の皆さまとも共同研究を実施して複数の試作機が作られ、飛行中のビジネスジェット機での SHM 機能の実証もできました<sup>2)</sup>。最近、SHM 用に製造された BOCDA 機器 1 台が現場に導入され、稼働しています。多くの BOCDA, BOCDR, BDG-BOCDA 機が販売・活用される日が到来することを、楽しみにしています。

光ファイバジャイロの研究では、種々の物理現象により生じる大きな雑音もその物理を熟知しつつ想起したアイディアにより桁違いに低減されることを体験しました<sup>1)</sup>。光ファイバ神経網の研究では、理論限界にあると思われた空間分解能も従来と全く異なるアプローチによって桁違いに改善されることを体験しました<sup>2)</sup>。学生の皆さんには、これらを伝えつつ、「工学では物理を駆使して手品をしている」と話しています。「手品の「タネ」作りには、学修内容への深い「理解」とそれらに基づく深い「思考」が必要です」とも。関連して、真の理解を得る為には「帰結に対応した理由に納得するまで考える」態度が必要です、とも話しています。この考え方は、論語に言う「学びて思はざれば則ち罔く、思ひて学ばざれば則ち殆ふし」に通じるものと思っています。

さて、「帰結に対応した理由に納得するまで考える」学修態度においては、理由に納得するまでは未知への挑戦が続く訳ですから、やり方次第では、学修は研究手法の訓練になると思っています。つまり、真の理解を得る為の学修法は研究力も磨いてくれる、ということです。研究経験は論理的思考力を鍛えますから、学生の皆さんは、大学での「学修」と「研究」の双方によって、「論理的思考力」という社会人にとって重要な「汎用力」を鍛錬している訳です。そこで、「大学でサボっていると勿体ないよ！」と、折に触れて伝えています。

筆者は既に古希を過ぎましたが、まだまだ「従心」とは参りませんので、言動には十分に気を付けつつ (!?), 引き続き人材育成活動に励んで参りたいと思っています。

#### 参考文献

- 1) K. Hotate: "Fiber Optic Gyros," A Chapter in "Optical Fiber Sensors," Volume IV, Artech House Publishers, pp.167-206, Jan. 1997.
- 2) K. Hotate: "Brillouin Optical Correlation-Domain Technologies Based on Synthesis of Optical Coherence Function as Fiber Optic Nerve Systems for Structural Health Monitoring," Applied Sciences (Feature Paper), Volume 9, DOI 10.3390/app901018, 2019.