

光ファイバ母材屈折率分布計測技術開発 の経験から

北海道工業大学 応用電子工学科
佐々木一正

From A Personal Experience In The Optical Fiber Preform Analyzer Development

Issei Sasaki

*Department of Applied Electronics
Hokkaido Institute of Technology*

Abstract

The author has an experience of study-abroad Southampton University (England), joining with the optical fiber communication research group where is the world most active in the field. The work given at the opportunity was on optical fiber preform analysis, that for the degree of PhD throughout 4 years and finally yielded a new measuring technique, that is small system but great in the contribution to the optical fiber industry. The knowledge about the index profile is invaluable both in optical fiber development and quality control of the fiber production. The group started a venture business and it was successfully done with a good collaboration between university and industry. Even after the end of the dream, efforts for the further development to the technique have been still making at Hokkaido Institute of Technology (Japan).

1. はじめに

世界中で爆発的に光ファイバの実用化が進む1980年ごろ、1人の日本人青年と英国の大学のプロフェッサーが薄暗い実験室で光学実験装置を前に、一つの光学像に見入っていた。場所は、イギリスのサウザンプトン大学、プロフェッサーとはプロフこと、Professor W. A. Gambling。青年とは、留学中の若き(?) 筆者である。光学

像とは、光ファイバの母材(プリフォーム)に横から光を当て、透過光を空間フィルタ処理することにより、偏向関数を可視化したものであった。偏向関数を実測できれば、この情報から内部の屈折率の分布形状を計算により求めることができる。この像は偏向関数を初めて可視化に成功したもので、その鮮明さは、偏向関数を極めて精密に計測できる可能性を物語るものであった。

当時、オーストラリアのChu[1][2]、Bell研

のMarcuse[3][4]、東大の大越[5]、東工大の伊賀[6]等、光ファイバ研究の中心的グループが光ファイバ母材の正確な偏向関数を計測する技術を開発するために凌ぎを削っていた。光ファイバにとって、屈折率分布形状は命である。この形状が不適當であれば、高速通信伝送路として役に立たない。従って、これを精密に測定することができなければ、新しい光ファイバの開発も、光ファイバの品質管理も暗中模索となってしまう訳であり、この計測技術の成否が今後の光ファイバ製造技術発展の命運を握っていたと言っても過言でない。その開発競争のま只中で新技術が誕生したわけである。‘空間フィルタ処理’という技術を使うということで、‘Spatial Filtering Method’と名付けた。

“Prof. You are really the first person, except myself of course, who sees this optical image that reveals the deflection function obtained from the optical fiber preform by using the optical, spatial filtering process.”

と青年が言う。初めて見た美しい光学像に感嘆符とともにうなづくプロフ…。

劇画なら多分こんな感動シーンから始まるはずの光ファイバ母材の屈折率分布計測技術開発での筆者の経験である。敢て公表するほどのことでもないのだが、本誌編集者の熱心なお薦めもあり拙文を寄稿した。実は、York Technology社(英)のP101系列のプリフォームアナライザはこの開発から生まれたもので、現在、世界中のほとんどの光ファイバメーカー等において広くご愛顧いただいている。

2. 研究の端緒

渡英したのは1978年の早春であった。

Professor W. A. Gamblingに師事するため北海道大学工学部助手を辞してSouthampton 大学に赴いた。Gambling先生の研究室は、世界中から新進気鋭の光ファイバ研究者を数多く集め、数々の重要な業績を上げ、光ファイバ研究のメッカ

であった。筆者は学位を取得することを目標に、博士課程に籍をおき、この研究グループに参加することになった。

筆者は化学出身であったため、研究室では、光ファイバ材料の開発に必要な化学的知識をもたらしてくれるものとの期待があったようである。しかし、当時は既に応用光学に転じており、化学的知識などとうに揮発してしまっていたから、期待外れと思われたかも知れないが、デイブ(Dr. D. N. Payne)との出会いにより、光ファイバ母材の屈折率分布測定が現在の課題の一つであると知らされた。しかし、当初はあまり本気でやるようなテーマではないと考え、ちょっと片手間にやろうと言う程度の受けとめかたであった。しかし、上述したように、光ファイバ研究の主だった研究者がそれぞれの独自のアイデアを展開し、華々しい研究競争の真最中であることがわかり、当方も急遽ファイト燃やすことになった。研究を進めるに当たって、研究スタッフのDr. Matsumura(その後、日立へ移籍)及びDr. Adams(その後、BTLへ移籍)等にも大きな影響を受け、ご教示いただいたことも少なくない。

3. 測定原理の着想

光ファイバの母材の内部屈折率を精密に測定することの重要性は上で述べたとおりであるが、母材は中間生成物であるから、測定は非破壊でなされなければならないことも必須条件である。そのためには、光を試料の横方向から当て、透過光から内部の情報を引き出すしか手はないと考えた。もともと、応用光学の領域を専門としていたので、研究を始めてすぐ、透過光を空間フィルタ処理すればよいのではないかという着想を得るに至った。

つまり、透過光をフーリエ変換すればフーリエ面では母材内部の屈折率分布により受けた歪み、つまり波面の向きの関数として展開されることになるから[7]、これを空間的に処理すれば波面の向き角を同定できる。空間処理とは空

間フィルタを用いることであり、また、波面の歪みの向きは、光線の向き（偏向）とは垂直の関係にあるから、空間の関数として光線の向きの情報（まさに、偏向関数）を獲得できることとなる。

理論が出来上がったので、この考えを実行する装置を作成し、実証してみせることになった。冒頭のプロフとの実験室でのやりとりはこのあたりの場面である。透過光を空間フィルタ処理することにより、偏向関数を像として表示することができる事を実演して見せたわけである。これをコンピュータに取り込み、数値計算を実行すれば屈折率が求められる。問題はどうかという点に絞られた。

（このとき、個人的なことであるが、父が病に倒れるという不測の事態が起り、一時帰国せざるを得ない状況となった。しかし、数か月後、再び自分の実験室に復帰できた。）

4. 第一世代装置の試作

装置の試作には良質のフーリエ変換レンズを必要とした。しかし、実験室にあるレンズはどれも収差が大きく使い物にならなかった。そこで、これはどうかと思って、持っていたCanonのカメラのレンズを外して使ったところ、実に鮮明な像が得られた。この像を見て、「いけるぞ!」と感じた次第。もし、このレンズがなければ、この方式を放棄していたかもしれない。

まもなく、試作1号機が出来上がった。これは、空間フィルタをある角度で固定し、光学像面に置いたリニアセンサを移動させることにより2次元の走査を行ない、像をコンピュータに取り込もうとするものである。この結果は従来のマイケルソン干渉計を用いた測定と極めてよく一致し、測定技術としての信頼を得たので、早速、速報で発表した[8]。この論文は後によく引用された。

しかし、当時、大越等（東大）も類似の方式を発表しており[9]、競合することとなったが、

当方はこれに負じと、空間フィルタ法の概念を拡張した続編を次々に打ち出すこととなる。

5. 実用化第二世代装置

空間フィルタ処理を動的フィルタにより実行する方式[10]、直接プロファイルを可視化する方式[11]などを考え出した。これは、第二世代と呼ぶべきであろうか。第一世代機に較べて、精度、及び、測定時間の短縮、自動化の容易さに大きな改善がなされ、1980年英ヨーク大で行なわれたBCOC'80にて発表した[10]。また、論展としてばかりでなく、エグジビションにも出店し、実演も行なった。この時のエピソードを1つ紹介させていただきたい。それまでは自研究室で作成されたCVD法により作成された母材ばかりを測定対象にしていたため、当時、シェアを急速に拡大していたVAD母材も一度は試してみたいと念願していたところ、奇しくも、電電公社の枝広氏（NTT）から提供頂けることとなり、これを当時の武蔵野通研野田所長が学会に出席されるついでに、直接持参してきて頂いたいきさつがある。このVAD母材での測定では、中心部に突起があることがわかった。CVDでは中心部は凹むことが多く、このプロファイルばかりを見てきた者には特に新鮮に感じた。

大越先生にはこの第二世代機を高く評価していただき、後の著書で詳しく紹介されている[12]。さらに、末松、伊賀両先生の著書にも測定技術として検討した結果が載っており、全ての項目で◎を付けていただいた[13]。大変光栄である。

6. 商売に乗り出す

実用性が十分であるとの自信を深めたので、それではということで、委託測定を引き受けることとなった。世界中から大量の母材が届き、半年で延べ1000回以上の測定をこなした。測定結果に対する評判は上々で、母材を線引きの前に評価することが如何に重要であるかを強く認識してもらったいい機会であった。

さらに、各方面からあまりにも強い要望があったので、我々は装置を商品化しようと思いつき、製造してくれる会社を探ることになった。しかし、どの会社も折り合いがつかず、らちがあかない。それでは研究室で新会社を設立しようということに話が進展してしまった。そんないきさつの末、社長には当時、ロックインアンブで有名であったブルックディール社からDr. クルース氏を引き抜き、プロフ、デイブが役職となって、York Technology 社を設立した。当時としては先鋭の技術者を集め、一年とかからずに、プリフォームアナライザの実用化第一号機P101を完成させた。筆者も日本の主要光ファイバメーカーを訪問し宣伝に努めた。特に古河電工の村田浩氏から身に余るお誉めをいただき、購入もしていただいた。しばらくすると、みるみる世界中に浸透し、その結果、世の光ファイバ関連の論文の様子が一変した。これまで、論文には光ファイバの屈折率分布は、このように作成した（つもり）という形状しか載っていなかったのに、以降、光ファイバ母材で確認した精密なプロファイルが堂々と第1図を占めるようになったのである。装置の開発者として、実際に役に立っていることが実感できる意味で嬉しいものである。その後、P101も進化を遂げながら、現在、世界中で数100台の装置が稼働しており、国際標準とまではいかなくとも、準国際標準として広く活用されていることは間違いないと思っている。

7. ちょっと時の人に

このような実績を認められてか、1981年10月、英国の電気技術者協会(IEE、本部London)から、Gyre & Landis 記念賞が贈られた。(このような表彰式には、日本では気ははずかしいのであるが、英国では夫婦で出席するのが通常である。しかし、その時、妻は出産のため帰国していた。)このことが、北海道新聞社(道新)のロンドン特派員から郷里の札幌に打電され、北海道ではちょっとしたニュースとなっていたらしい。

受賞理由、仕事の内容など細かに取材され、それがそのまま報道された。10月9日の1度だけの報道であったのに、その記事をかなりの人達が覚えていてくれて、帰国後、自分がどのような仕事をしてきたかを一々説明する必要がなく、大変助かった。

英国では、我々の活躍は沈下ぎみの英国経済を奮い立たせる役も果たしたらしく、この功績で女王陛下から勲章を受けるところまでいった。

8. 学位論文のギネス記録

ところで、学位の方はどうなってしまったのかと思っていると、プロフが突然研究室に現われて、3週間後にPhDの口頭試験をやるので学位論文を用意しろと伝えた。普通なら何と理不尽な要求かと思うが、自分の回りの英国人は、かなり困難なことでも日本人ならできると信じ込んでしまっている。こうなりゃ意地だ。まず最初の1週間で下書きを書いた。さらに、片端からプロフに英文の添削をしてもらう。次の1週間でタイプを打ってもらった。プロフの秘書のニッキーが精力的に頑張ってくれて、200ページを1週間で打ち上げた。その間に挿入する図表、写真等を100ページ分準備した。そして、最後の1週間。2日間で製本し、残りを試験官に査読してもらう時間とした。予定どおり、3週間で口頭試験の準備は完了した。同僚はギネス記録だ!と言ってくれた。

9. そして帰国

帰国が迫っていた。その頃デイブとクルース社長を交えての会話である。「英国に残れよ」「いや、妻が帰国したいと言っている。妻の言うことを聞くのが模範的な英国の亭主の習慣だろう?」と言うと。「じゃ、離婚しろ。」半ば真面目な顔をして迫ったものである。英国での生活に不満があるわけではない。この頃には、大学の正規の研究スタッフ(Research Fellow)になっていたし、York社からは役職の待遇を受けていた。しかし、一刻も早く帰国して病床の

父親の看病に当たらなければならない個人的理由があった。

10. 新天地北海道工業にて (エピローグ)

帰国後、現在の勤務先、北海道工業大学に落ち着いた。ここで全く新しいテーマに取り組みたいと考え、膨大な研究資金を獲得して光通信の研究室を開設した。しかし、これまでのテーマも捨てることができないうる。如何に新技術であっても、時代とともに陳腐化してゆく。空間フィルタ法も例外ではない。時代の発展とともにより高度な要求に応じてゆかなければならない。つまり、一つの技術が生き延びてゆくには継続的技術開発による側面支援を必要としているのである。自分で開発した技術であるが故に、自分が面倒を見なければならない。そんな責任感が、今度は学生の尻をたたきながら、現在も引き続き技術の改善と、より測定困難な試料への挑戦を続けさせている[14]-[16]。

おわりに

回顧録ようになってしまい、末尾になってから、拙文を後悔している。しかし、これまでに、お世話になった方々に謝辞を呈する機会もなかったので、この場をお借りして、感謝の意を表明させていただければ幸いと思う。本文では、差し障りのない範囲で実名で記した。ご迷惑にならないことを願う次第。添付の写真は光ファイバ母材とプロフと筆者のスナップである。

参考文献

- [1] P. L. Chu: "Nondestructive measurement of index profile in an optical-fiber preform", *Electron. Lett.*, 13, 24, pp. 736-738(Nov. 24, 1977).
- [2] C. Seakeng and P. L. Chu: "Nondestructive determination of refractive index profile of an optical fiber: backward light scattering method", *Appl. Opt.*, 18, 7, pp. 1110-1116(1979).
- [3] D. Marcuse and H. M. Presby: "Focusing method for nondestructive measurement of optical fiber index profiles", *Appl. Opt.*, 18, 1, pp. 14-22(Jan. 1, 1979).
- [4] D. Marcuse: "Refractive index determination by the focusing method", *Appl. Opt.*, 18, 1, pp. 9-13(1979).
- [5] 大越孝敬, 保立和夫, 吉村俊郎, 下山博義: "干渉法による光ファイバリフォーミングの屈折率分布の測定", 信学会光量エレ研究会, OQE76-90(1977).
- [6] Y. Kokubun and K. Iga: "Refractive index profile measurement of preform rods by a transverse differential interferogram", *Appl. Opt.*, 19, 6, p. 846(1980)
- [7] フーリエ変換レンズの焦点距離を f としたとき、 $\omega = f \cdot \tan \phi$ の関係が成り立つ。ここに、 ω はフーリエ面にとった座標、 ϕ は波面の傾きである。
- [8] I. Sasaki, D. N. Payne and M. J. Adams: "Measurement of refractive-index profiles in optical-fiber preforms by spatial-filtering technique", *Electron. Lett.*, 16, 6, pp. 219-221(1980)
- [9] T. Okoshi and M. Nishimura: "Measurement of axially nonsymmetrical refractive index distribution of optical fiber preforms by a triangular mask method", *Appl. Opt.*, 20, 14, pp. 2407-2411(1981).
- [10] I. Sasaki, D. N. Payne, R. J. Mansfield and M. J. Adams: "Variation of refractive-index profiles in single-mode fiber preforms measured using an improved high-resolution spatial-filtering technique", 6th ECOC, pp. 140-143(York, 1980).
- [11] I. Sasaki and D. N. Payne and R. J. Mansfield: "Endface index profiling

of optical fiber preforms", Appl. Opt.
21, 23, pp. 4246-4252(1982)

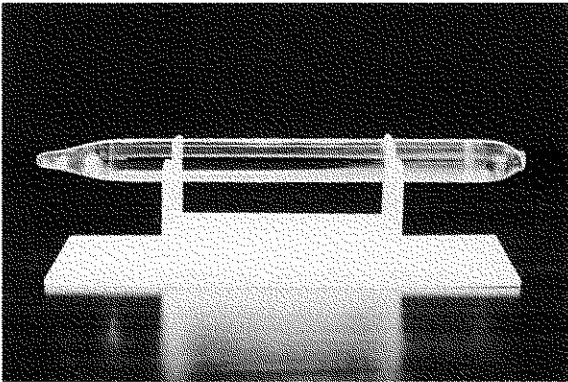
[12] 大越孝敬, 岡本勝就, 保立和夫: "光ファイバ", オーム社(1983)

[13] 末松安晴, 伊賀健一: "光ファイバ通信入門", オーム社(1989)

[14] I. Sasaki and Y. Hirata: "Accurate measurement of radial refractive index distribution in a GRIN preform with refracted ray tracing method", MOC/GRI N° 89, pp. 188-191(1989).

[15] 佐々木一正, 藤岡良吉, 初田健: "ビームシャリング法による光ファイバ用母材ガラスの屈折率測定", 平成5年度北海道工業大学研究紀要, 第21号, pp. 163-171 (1993).

[16] 佐々木一正, 藤岡良吉, 菅沼和城, 初田健, 牟田健一: "光ファイバ用素材ガラスの屈折率測定技術-ビームシャリング法の原理とデータ処理-", 1993信学会春季全大, C-330(1993).



光ファイバ母材の一例

A typical optical fiber preform
(Courtesy of Showa Electric Wire & Cable
Co., Ltd.)



プロフとのスナップ (1986年、東京にて)
Snap-shot with Professor W. A. Gambling,
in Tokyo(1986)