水素による光ファイバ損失増の 発見と防止策の確立

— 最悪のシナリオを際どく回避 —

独立行政法人産業技術総合研究所 内田直也 Naoya Uchida

はじめに

日本電信電話公社（現在の NTT，以下「NTT」と称する）は 1981 年 12 月にグレーデッド（GI）型多モードファイバを用いた中継伝送用光ファイバ通信システムを初めて商用に導入した。このシステムは中小容量光伝送方式^{*1}と名付けられ、短距離の中継回線に適用される 100 Mb/s 以下の方式であるが、従来の同軸ケーブルを用いたシステムに比べて性能が格段に向上し、期待どおりの特性を示した。そこで NTT では更なる大容量・長距離伝送を目指して、単一モード（SM）ファイバを用いた大容量光伝送方式^{*2}を 1983 年 12 月ごろから導入する計画を立て、研究所（以下、当時の呼称に従って「通研」と称する）が主体となって技術開発を着々と進めていった。このように光通信システムの導入は順調に進展するはずであった。

しかしながら「好事魔多し」の例えどおり、光ファイバ通信の将来を揺るがしかねない大事件が勃発した。光ファイバ通信システムが本格的に導入され始めた直後に、現場に布設した光ケーブルで深刻な光損失増が観測されたのである。本開発物語ではこの損失増現象について、発見の経緯と原因究明への取り組みから防止策の確立まで、1 年半にわたって奮闘した歴史を述べる。

現場布設ケーブルでの光損失増を発見

我々は現場試験 FR2^{*3}で、1980 年 1 月～6 月にかけて川崎市内の管路と電柱に布設・架渉した波長 1.3 μm 用の GI ファイバケーブルについて、半年ごとに光損失を測定していた。1982 年 6 月に測定したときに、1.3 μm

- * 1 中小容量光伝送方式：適用距離がおおむね 50 km 以下で、近隣都市間あるいは同一都市内の中継回線に適用され、当時のハイラーキーで 100 Mb/s 以下のビットレートを使用した伝送方式。
- * 2 大容量光伝送方式：適用距離がおおむね数百 km 以上 2,500 km 以下で、SM ファイバを用い当時のハイラーキーで 400 Mb/s 以上を使用した方式。
- * 3 現場試験 FR2：1978 年 3 月から東京都内で実施した FR（Field Research）1 に引き続き、1980 年 1 月から川崎市内で実施した現場試験の呼称。中小容量光伝送方式の実用化のための最終確認を目的として実施。

での損失が測定誤差の範囲を超えて増加しているらしいとの結果が得られた。数多くのデータを調べると、ファイバによっては全く増加していないものもあったが、かなりの数のファイバの損失が確実に増加しているように思えた。しかし 1.3 μm のみで測定していたので損失増があまり大きくなかったため、事態がそれほど深刻であるとは夢にも思わなかったが、改めて波長特性を測定したところ図 1 に示すような驚くべき光損失増が観測された^{(1),(2)}。特にファイバが最低損失を示す 1.5 μm 帯での増加が特徴的であった。

実はこの半年前の 1 月に測定したときも、一部のファイバで 1.3 μm の損失がわずかに増加しているように見えた。しかし当時研究室では SM ファイバを用いた現場試験 FRL^{*4}の真っ最中で、この結果をゆっくり吟味する余裕がなかった。そこで「寒さでケーブルが縮んで損失が一時的に少し増えたのかも…」ぐらいに軽く考え、「6 月には FRL が一段落するのでそのときにちゃんと測りましょう」ということにして、それ以上は深く追求しなかった経緯があった。

当時ファイバの経時変化を測定するときの認識は、「石英ガラスは極めて安定な物質だから変化は起こらないだろうが、実用化に向けて確認が必要なのでデータを取っておこう」と念のためという気持ちで測定するため、変化が起きていないと考える方向に意識が行ってしまう危険

図 1 現場に布設した光ファイバケーブルで観測された光損失増

- * 4 現場試験 FRL：1980 年 10 月から武蔵野通研と新設工事の厚木通研間を結んで実施した試験の呼称。大容量光伝送方式の実用化のために実施。

性があり、このときに見逃してしまったのもまさにそういう心理状態によるものであった。余談であるが、このケースの場合には半年後に現象が明らかになり、遅れたとはいえ決定的なミスにはならなかったが、科学の歴史において今までの常識では理解できないデータを目の前にして、柔軟な発想ができなかったために大発見を逃したケースが数多くあったのではないかと考えられる。科学においても従来からの常識は当然大切ではあるが、従来の常識という固定観念に捉われすぎることが、研究者にとって大変危険であるという貴重な教訓を与えてくれた。

実験室での再現を目指して悪戦苦闘

光ファイバケーブルが現場に布設されてから僅か2年で、ケーブル中のファイバがこのような損失増を起こすようでは、実用的な伝送路として使用することは全く不可能である。そこで筆者が室長を務めていた NTT 茨城通研の光線路研究室が主管となり、光ファイバ製造技術を担当していた光材料研究室及び共同研究を行っていた電線メーカーの全面的な協力を得て、原因究明とその防止策の確立に向けて早速活動を開始した。当時、通研と電線メーカーは SM ファイバを用いた大容量光伝送方式の実用化に向けて、数か月以内に技術を仕上げる必要があり猫の手も借りたいぐらいの忙しさであった。通研では現場試験を含めて数年間積み上げてきた成果を、分厚い技術資料^{*5}にまとめる作業に追われていたが、より緊急性の高い仕事に加わったため、徹夜も当たり前という状況の中で検討を進めることとなった。

なお、本現象の原因究明と対策確立がされないうちに情報が外部に漏れてしまえば、国内外の関係企業や研究機関が競ってこの問題に取り組み、成果のほとんどが我々の手を離れて外部に持っていかれる恐れがあった。更に、この情報をマスコミが知るところとなれば、光ファイバは使い物にならないというレッテルが貼られて、順調に導入が始まった光通信に決定的なブレーキが掛かり、その悪影響が将来まで尾を引くことになる恐れもあった。そこで NTT と電線メーカーでは社内においても限られた人以外にはこの情報を漏らさない、ましてや外部には絶対に漏らさないよう厳重な箝口令を敷いた。なお、この箝口令は原因が分かり解決策が明確となった翌年7月まで1年強続けた。その間 NTT と電線メーカーでは、関係部署の幹部及び研究者・技術者など合わせて何百名かの人々が、程度の差こそあれこの事実を知っていたと思われるが、これほど多くの方々が1年間秘密を守ってくださったお蔭で情報が外部に漏れることが回避されたわけであり、これらの方々に心から感謝した次第であった。

* 5 技術資料：通研での研究開発の最終段階で、成果をまとめて当時事業部門の技術の総まとめであった技術局に送付する資料。

一方、この現象は研究者魂を燃え立たせるのに十分なインパクトを与えた。筆者はこの現象を見た瞬間、大変なことが起きてしまったとショックを受けたと同時に、逆に研究者の立場からは「これは大発見だ。是が非でも我々の手で真実を解き明かそう」と、うれしくて身震いをしたことを今でもはっきりと覚えている。まさに神様が我々に与えてくれた大きな贈り物と感じた次第であった。

さて、いよいよ原因究明のために検討を開始したが、まずはこの現象を実験室で再現することが先決であった。しかし当時の知識として、安定な石英ガラスの内部でしかも常温で化学反応が生じていることなど到底思い浮かばず、何らかの物理的原因によって接続部やファイバの損失が増えたものと考えた。そこで最初に接続部を疑ったが全く損失増は生じていなかった。更に当時の常識として、ファイバに側圧が加わると波長依存性のない、いわゆるマイクロバンド損失が生じることが知られていた。そこでファイバに側圧や曲げを加えた状態で光の入射条件をいろいろ変えたり、更に温度も $-40 \sim +60^{\circ}\text{C}$ まで繰り返し変化させて損失を測定したが、現場で観測された波長特性を再現することが全くできなかった。

損失増の本質に迫る

様々な実験を繰り返しても現場で観測されたような特徴ある損失特性が得られず、むなしく2か月近く過ぎていった8月のある日、やっとファイバ心線の高温特性を測定することを思いついた。普通に考えれば当たり前の実験手法であり真っ先に行くべきであったが、ここでも「現場での現象が常温で生じているから化学的な現象ではない」という固定観念が邪魔した大失敗であった。そこでナイロンを被覆した通常の光ファイバ心線を 200°C に加熱したところ、図2 (a) に示すように OH 基による $1.4 \mu\text{m}$ 付近の損失が増加するとともに、それ以上の長波長帯での損失も増加する結果が得られた⁽³⁾。更に $1.4 \mu\text{m}$ 近傍の損失変化に着目すると、図2 (b) に示すように損失ピークの形状が変化し、Si-OH の第

図2 ナイロン被覆光ファイバ心線を 200°C に加熱したときの OH 基損失の変化

2 高調波 $1.39\ \mu\text{m}$ (基本吸収波長 $2.73\ \mu\text{m}$) のピークに加えて、Ge-OH の第 2 高調波 $1.41\ \mu\text{m}$ (基本吸収波長約 $2.8\ \mu\text{m}$) にも吸収の肩が生じることが分かった⁽³⁾。

特に図 2 (a) の損失の変化は図 1 に示した現場における経時的な損失増に類似しており、現場で生じた現象に近い変化が実験室でも再現できることが明らかになった。これで大きな手掛かりが得られたと考えていた矢先の 1982 年 10 月初めに、我々の研究室内で損失増の解明とは別に光ケーブルの特性評価を担当していた研究者が、「大変不思議な損失特性が観測されました」といいながら測定データを持ってきた。図 3 (a) に結果を示すが、光ケーブル内に水を入れて 8 か月間放置後にファイバの損失を測定したデータであった⁽⁴⁾。水を入れる前の最初の損失カーブ (初期値) と比較して、 $1.08\sim 1.24\ \mu\text{m}$ の間で幾つかの損失ピークが見られるが、このグラフで最も重要なことは、波長 $1.4\ \mu\text{m}$ 以上での損失増の傾向が現場で測定した結果と酷似していたことであった。

直感的にこのデータが大変重要な意味を持っていると考えた我々は、直ちに $1.08\sim 1.24\ \mu\text{m}$ の損失が何に起因しているかを突き止めるために、必死になって過去の文献を調査した。その結果、我々が現場での損失増を発見したちょうど 1982 年 6 月に発行された米国の学術誌 Optics Letters に、Bell 研の Stone ら⁽⁵⁾ によりラマン増幅の媒体に使用する目的で水素分子を拡散させたファイバの透過率特性が発表されているのを見付けた (図 3 (b) 参照)。このカーブを見て我々の疑問が一気に水解した。図 3 の縦軸が (a) は損失、(b) は透過率のため値が上下逆になっているが、まさに水を入れたケーブル中での光ファイバの損失カーブがそこに示されていた。すなわち、我々が観測した $1.08\sim 1.24\ \mu\text{m}$ の損失増が水素分子によることが確認できたことから、図 3 (a) での $1.4\ \mu\text{m}$ 以上の損失はその波長域における水素分子による損失 (後出の図 4 参照) と、水素により新たに形成された OH 基による損失が合算されたものと推定できた。

図 2 の特性に加えて、偶然別の目的で得られた図 3 (a) の発見が解決への全ての突破口となった。使用した光

図 3 (a) 水注入了光ファイバケーブルにおける光損失増、(b) H_2 ガスを圧入した光ファイバの透過率特性

ケーブルでは鋼鉄線よりなる抗張力体、銅線の介在対、及びケーブルのプラスチック外被のすぐ内側に Al 薄板よりなる LAP シースが使用されており、異種金属の存在によりケーブル中に入れた水で電気分解が起こり水素が発生したのである。水素分子の大きさはわずか $0.1\ \text{nm}$ オーダであるから、 SiO_2 の網目の中に自由に入り込むことができ、図に示した損失が現れたと断定できた。ここまで分かれば、後は比較的簡単であった。

水素分子による損失と OH 基生成による損失増

図 4 は光ファイバを海水につけ、3 日間 $1\ \text{A}$ の電流を流したときのファイバ損失を $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ まで測定した結果である^{(1), (6)}。図中 A (波長 $2.42\ \mu\text{m}$) は水素分子の基本的伸縮振動に対応した吸収損失であり、K (波長 $1.24\ \mu\text{m}$) はその第 2 高調波である。 $2.24\sim 1.08\ \mu\text{m}$ までのそのほかの損失ピークは、 H_2 の伸縮振動と回転振動の混合振動あるいは H_2 の伸縮振動と SiO_4 四面体の伸縮振動との混合振動によるものと考えられる。

図 5 には $0.1\ \text{A}$ の電流を 14 日間印加し、電流停止直後に測定した損失特性を青い点線で、更に電流停止後

図 4 光ファイバを海水につけ電流を流したときの損失波長特性

図 5 光ファイバを海水につけ電流を流したときの損失波長特性。青色の点線は 14 日間電流を印加し電流を停止した直後の特性。赤色の実線は電流停止から 30 日後に測定した特性

30日間放置した後に測定した損失特性を赤い実線で示す⁽⁷⁾。青い点線のカーブには図3(a)でお馴染みの水素分子による1.08～1.24 μmのピークが見られ、更に1.4 μm以上で2.42 μmに向かった損失増が現れている。一方、赤い実線のカーブでは1.08～1.24 μmのピークが完全に消失し、代わりに1.39と1.41 μmのSi-OH及びGe-OHの第2高調波による損失、及び1.55 μm付近のP-OHの第2高調波(基本波は3.05 μm)による損失が増えていることが分かる。すなわち、電流停止から30日後にはファイバ中に侵入していた水素分子が外部に逃げてしまったが、一部の分子がSi-Oのネットワークの欠陥にトラップされてOH基を生成し、その損失が増加したものと結論できた。

この損失変化から分かるようにH₂による損失増は可逆的な現象であり、H₂がファイバ外に出てしまえば完全に消失することが分かる。それに対してOH基は下の式で示すように、一旦生成されれば安定化して元には戻らない非可逆的な現象である。(ここにMはSi及びドーパントの元素であるGeやPなどを表す。)

OH基の形成が非可逆現象であることは、図2に示したナイロン被覆ファイバを200℃で熱したときの光損失増が常温に戻しても変わらず、更にその後ナイロン被覆を除去しても変わらなかったことから裏付けられた⁽³⁾。以上の結果から、現場で観測された損失増を発生させた主役が水素であることが分かり、それ以降我々はターゲットを絞った検討を進めることができた。

なお、当時のファイバではドーパントとしてGeO₂及びP₂O₅が広く使われていたが、その使用量は製造法によって異なっており、更にメーカーによって独自の量が使用されていた。特にP₂O₅を使用すると堆積させたスートのガラス化温度が大幅に下がって製造が楽になり、併せてレイリー散乱損失も減らせることから低損失なファイバを得るために必須の材料とされ、MCVD法^{*6}では多量のP₂O₅が使用されていた。しかし図6に示すように、P₂O₅の含有量が多いファイバほど1.55 μmの損失増が大きくなることが分かり⁽³⁾、一転して使用が控えら

図6 GeO₂とP₂O₅を共添加した光ファイバにおける1.55 μmでの損失増のP₂O₅含有量依存性

れるようになった。一方VAD法^{*7}ではコアとして(SiO₂+ドーパント)のスート、クラッドとしてSiO₂のスートを堆積させたあと、全体を一度にガラス化する方法がとられる。そこで両者のガラス化温度が違いすぎると製造が難しくなることから、ドーパントとしてGeO₂のみを用いていたため損失増が小さく、結果的にVAD法の有利性が引き立つこととなった。

プライオリティの確保に対する葛藤

上述のとおり現場で観測された損失増は、ファイバ中に侵入した水素がSi-O-、Ge-O-、またはP-O-の未結合のダングリングボンドと結合してOH基を形成した結果であることが分かった。すなわち、図2でナイロン被覆心線を200℃に加熱したときに生じたOH基が、常温においても生成したことが本現象の本質であること、損失増を減らすためには被覆等からの水素発生を防止するとともに、ファイバ中のネットワークに存在する欠陥を可能な限り減らすことが抜本的に重要であるという、損失増のメカニズムの概略を明らかにすることができた。

1982年12月末にここまで解明することができたが、この段階で万一にも同様のデータがほかの機関から発表されてしまったら、一番重要なデータのプライオリティを失い今までの我々の努力が無駄になってしまうと考え、いても立ってもいられない気持ちになった。その思いが日増しに強くなり、もうここまで分かったのだから、最初損失増を発見したときに関係者にお願いした厳重な箝口令のことは大目に見てもらって、研究者として論文にまとめたい誘惑がますます強くなった。

*6 MCVD法 (Modified CVD法, 内付け法): Bell研が開発したファイバプリフォームを製造する方法。石英ガラス管内に原料ガスを送り込み管の外側から酸水素バーナで加熱し、管の内面にスートと呼ばれるガラスの微粒子を堆積させる方法。

*7 VAD法 (Vapor-phase Axial Deposition法, 軸付け法): 我が国で開発されたファイバプリフォームを製造する方法。酸水素火炎中で原料ガスを吹き付けて、種となる棒の上にスートを堆積させ、その棒を上方に移動させることによりスートを連続的に堆積させる方法。主要なプリフォーム製造法として、ほかにCorning社が開発したOVD法 (Outside Vapor Deposition法, 外付け法) がある。

そこで当然ではあるが、現場で観測された図1に示した損失増、及び図3(a)と図5に示した水素分子が原因で生じた2種類の損失増、すなわち可逆的な H_2 損失増と非可逆的なOH基損失増の存在については一切口をつぐんで、単にナイロン心線を $200^\circ C$ に加熱したら $1.4\mu m$ 近傍のOH基損失が増加したという図2の結果、及びドーパントとしてPを多く含むファイバほど損失増が大きいという図6の結果などを、“hydrogen”という言葉は一切使用せず、淡々と述べたレターをまとめて1983年1月末に米国の学術誌Applied Physics Lettersに投稿した。投稿の際には当然直接の上司や主だった関係者の許可を得たが、投稿して原稿が手元を離れた途端、「やはり早すぎたのではないかな？ この論文を読んだ人が現場での損失増との関連に気付く、我々より先に完全な防止策を確立させてしまったら今度こそ後悔してしまう」と急に心配になり、投稿後2、3日のうちにEditorに手紙を書いて投稿を取り下げた。

その後2か月の間は、せっかくの重要データを発表してそのプライオリティを確保したいという研究者としての功名心と、対策を100%確立するためには検討課題がまだ残されていて、今の時点での発表は早すぎるといふ技術者としての抑制心が葛藤し非常に悩んだ。しかし、ファイバのプラスチック被覆に関して水素の発生を防ぐ製造条件を確立することができ、またファイバ中の欠陥に関してもドーパントを用いる限りは完全にはなくせないが、Geのみをドーピングする場合は長期使用に対して損失増を許容範囲に抑えることができるので、対策の確立という意味でかなりのレベルに達したと自らを納得させて、先にまとめたあとと寝かせておいた原稿そのままを3月下旬に再投稿した。

その結果、論文は採択され8月15日号に無事掲載された⁽³⁾。特に幸運だったことは、掲載直後にこの論文に対する問い合わせや別刷りの請求がなくほとんど興味を引かなかったようであり、恐らく現場の光ファイバケーブルで観測された損失増と同じ現象であると気が付いた人は、その当時いなかったであろうと推測している。大きな賭けではあったが、他人にはこのデータの重要性に気付かれずに本現象の最も本質的なデータのの一つに対するプライオリティが確保できたことでほっとした。

現象と検討結果の全ての解禁に踏み切る

3月に論文を投稿後、更に数か月間データを積み上げた結果、長期間実使用した際の光損失増を許容範囲内に収めるための対策が確立できたと考えて、1983年7月末にこれまでの方針を180度転換し、外部への論文投稿を解禁し今までの成果を全て発表することとした。実はその背景として、外国のあるメーカーが製造した光ファイバケーブルが現場で損失増を起こし、顧客から損

害賠償を求められているという情報が入ったことが最大の理由であった。この話が広まって損失増現象が世間に知られたあとに、我々が今までの検討結果を発表したのでは、その先導性とインパクトが半減してしまうため、至急通研と事業部門の責任者の了解をとって発表に踏み切ることとした。その際事業部門からは、「外部発表を許可せざるを得ないが、引き続き対策の検討に万全を期してほしい。事業部門としてSMファイバシステムの事業への導入に踏み切るか、あるいは光伝送システム全体の導入を中断して一時棚上げするか結論を予定どおり1983年12月に出したいので、その判断ができる十分なデータを揃えてほしい」と厳命された。

そこで1982年10月に発見した図3(a)、すなわち水を入れた光ケーブルで H_2 による損失増とともに、現場で観測されたと同じOH基の形成による損失増が観測されたことを英国の学術誌Electronics Lettersに投稿した⁽⁴⁾。このデータは現場での損失増現象を示唆する最重要なデータの一つであることから、ぎりぎりまで伏せておく必要があると判断したものであり、満を持して10か月後の1983年8月初めに投稿し9月15日号に掲載された。

なおKDD研究所もファイバを水に入れて電流を流すことにより、 $1.08 \sim 1.24\mu m$ に H_2 による損失増が生じたという論文を投稿した⁽⁸⁾。この論文は我々より2週間早い7月下旬に投稿され、1号前の9月1日号に掲載され、その年のElectronics Lettersの最優秀論文に選ばれた。

欧州光通信会議(ECOC)での発表

我々は1年余り積み上げてきた成果を、最もタイミング良く、しかも効果的に発表することを考え、光通信に関して最も権威のある国際会議の一つであり、1983年10月23～26日にスイスのジュネーブで開催される欧州光通信会議(European Conference on Optical Communication, ECOC)に、ポストドクトライン(PD)論文として投稿した⁽¹⁾。図7に投稿論文の冒頭部分を示した。PD論文とは正規の論文を締切ったあと会議開催の直前まで募集し、聴衆が興味を引きそうな先導的な結果を発表するものであり、我々の論文はPDセッションのトップで発表する栄誉に浴した。

発表時点で最新のデータを盛り込んだ講演にするために、電線メーカーから研究者に同行して頂き現地では毎朝(日本時間では同じ日の夕方)会合を開き、日本でその日に得られた最新のデータをFaxや電話で送ってもらい、それを基に議論して発表内容を補強あるいは修正するとともに、その晩から翌日にかけて実施してほしい実験を具体的に依頼した。当時ワープロではなく日本で作成して持参したスライド自体を書き換えることはで

INFRARED LOSS INCREASE IN SILICA OPTICAL FIBER DUE TO
CHEMICAL REACTION OF HYDROGEN

NAOYA UCHIDA, NAOSHI UESUGI, YASUJI MURAKAMI, MOTOHIRO
NAKAHARA, TADATOSHI TANIFUJI, and NOBUO INAGAKI

IBARAKI ELECTRICAL COMMUNICATION LABORATORY, NTT
TOKAI, IBARAKI-KEN, 319-11, JAPAN

Abstract

Time, temperature, and wavelength dependent infrared
optical loss increases were found out for silica fibers. It
is clarified that H_2 permeation and OH bonds formation due
to chemical reaction in fiber core cause the loss increases.

1. Introduction

Optical fiber transmission systems are now being widely
introduced in various areas of public and non-public commu-
cation networks. Especially, the systems operated in the
wavelength region around $1.3\mu m$ are decisively advantageous
because of low-loss and dispersion-free characteristics of
the fibers. However, last year, we found out a phenomenon
that the optical loss for a part of field-installed optical
cables increased gradually with time at wavelengths longer
than $1.2\mu m$. The problem might obstruct the practical use of
the long wavelength transmission systems, and extensive
studies have been made for more than one year. As a result,
we have almost clarified apparent origin of the phenomenon
and have established countermeasures to prevent the loss
increase to the practically tolerable extent. The results
obtained in the studies are summarized in this paper.

2. Aging characteristics of optical cable

We constructed experimental optical transmission lines
connecting telephone offices in Kawasaki city on May, 1980.

図7 第9回欧州光通信会議に投稿した論文草稿

きなかったが、最新のデータに基づいて話す内容をブラッシュアップすることができ、大変心強いチームとして機能した。

PDセッションは25日の午後に開催されたが、発表時間が12分、その後の質疑応答が3分ということで、限られた僅かな時間で(1)現場で光損失増が観測されたこと、(2)それを実験室で再現できたこと、(3)その原因はファイバ中に侵入した水素分子が欠陥にトラップされてOH基が生成されて損失が増加したこと、(4)損失増を防ぐためにはファイバ中の欠陥を可能な限り少なくし、併せてファイバの周囲で発生する水素(ファイバのプラスチック被覆からの発生が主要因)をできるだけ少なくすべきことなど、1年強の間に貯めておいた盛り沢山のデータを駆け足で発表した。特にファイバ中の欠陥を少なくするためには、ドーパントとして P_2O_5 を使用しないことが実用上極めて重要なことを示した。

セッションでは私の次にBritish Post Officeの研究所からも損失増現象を発見したことのみが報告されたが、その報告及び参加者との情報交換によりこの現象が世界中で大問題になっており、皆が必死になって原因と解決策を模索していたことを知った。我々が現象の発見から防止策の確立までの全てを発表したことは、まさにこのとき以外にないぎりぎりのタイミングであり、僅かの差で世界的なプライオリティを獲得することができた。

発表後、沢山の研究者が私のところに来られ質問攻めにあった。私としても大役を果たして心身ともにめぬけの殻になり、それ以降のセッションに出る気にもならなかったもので、セッション開催時間中もロビーで質問に丁寧に対応した。中でもBell研のL.G. Cohen氏は実に熱心で何度も質問に来られ根掘り葉掘り聞いて行かれたが、本現象が水素に基づくことを我々が初めて把握でき

図8 熱可塑性シリコン樹脂からの水素発生量の混合比依存性

たのは、Bell 研の Stone ら⁽⁵⁾ による水素分子の損失データのお蔭であり、その Bell 研から質問攻めにあったのも不思議な巡り合わせであった。

事業部門への報告資料の作成

1983 年も終わりに近づき、事業部門から最終結論を求められている期限が迫ってきたため、長期信頼性が確保された旨の説明用データのとりまとめを行った。当時は光ファイバ被覆用のシリコン樹脂として熱硬化型を使用していたが、主剤に対する硬化剤の混合比率を1以上にすると未反応の硬化剤から経時的に水素が発生すること、硬化剤の量を主剤と同じ量にすると水素の発生量が激減し、しかも被覆材料としての緩衝効果や安定性に問題がないことが分かり、硬化剤の量を精密に制御することが重要であることを確認した。図8に熱硬化型シリコン樹脂の組成と水素発生量の関係を示した⁽⁹⁾。

その後シリコン樹脂としてUV硬化型が提案されたが、水素発生量が熱硬化型より少ないことが確認され、実用ファイバに一般的に使用されるようになった。更にコア部にドーパントを含まない純粋石英コアファイバでは、OH基の損失がほとんど生じないことも確認された。

それまでの詳細な検討結果をまとめて、SM光ファイバケーブルの損失が経時的にどのように変化するかを予測した結果を図9に示す⁽¹⁰⁾。波長1.3μmと1.55μmにおいて20年間に予測される損失増を、温度と水素分圧に対してプロットした。1.55μmの方がはるかに条件が厳しいが、損失増を0.01 dB/kmに抑えるためには、水素分圧を 10^{-4} 気圧以下にする必要があることが分かった。この条件は、ケーブル中への水の侵入を防ぐことは当然として、ファイバ被覆をはじめケーブル中に存在するプラスチック材料から長期的に水素が発生しないように、製造時の重合反応を完全にコントロールすることにより十分実現可能である。以上の結果から損失増を完全に防ぐことはできないが、長期にわたって実用上許容できる範囲内に抑えられるという結論に達した。

図9 20年間に予想される光損失増の水素分圧と温度依存性

事業部門の決断は“Go!”

以上の結果を1983年12月に事業部門に報告し、製造条件を注意深く制御すれば問題なく長期間使用できることを説明した。それを受けて事業部門は直ちにSMファイバシステムの本格導入を決断した。その目玉となる伝送路として、旭川から鹿児島まで総延長3,400 kmに及ぶ400 Mb/sの日本縦貫光線路の建設が進められ、1985年2月に無事完成した。これにより光通信システムがNTTの幹線網に定着し、光通信全盛時代の幕開けとなった。現場での損失増の発見から解決策の確立まで、まさに月単位を争う際どい綱渡りで学術的なプライオリティが確保でき、同時に実用的にも最大の危機を乗り越えることができた。

本格導入が決定された1983年12月末に、筆者は朝日新聞の取材を受け1年半に及ぶ検討の経緯を詳しく説明した。そのときの記事の一部を図10に示す⁽¹¹⁾。筆者は記者がこの損失増を「ファイバ中の癌」と表現したアナロジーの巧みさに感心した。なぜならば癌は多くの人の体内に発生するが、それが元で命を落とすかどうかは、ひとえに癌の増殖の程度にかかっている。一方、損失増もコアにドーパントを入れる限り欠陥が生じ、そこに水素が入れば必ず欠陥と結合してOH基損失が生じる。すなわち自然界として避けられない現象であり完全にゼロにはできないが、その増殖を抑えられれば損失増が実用上許容できる範囲に収まり、命を落さずに済むという意味であった。

あとがき

以上、我々は1年半の検討により20年間以上損失増

光ファイバ中の癌

朝日新聞朝刊(1984年1月8日号)より転載

図10 光ファイバ中の癌(朝日新聞による取材)

が実用上許容できる範囲に抑えられることを明らかにした。その後、本現象に関して学術的及び実用上の観点から国内外で詳細な検討が行われ、安定性をより向上させるためにファイバ表面に気密性の被膜をコーティングする方法や、光ファイバの製造工程で重水素処理を行う方法が提案されてきた。特に重水素処理法は OD 基による損失が通信用に使用される波長外にシフトするため、我々が経時的な損失増を発見する以前の 1980 年ごろから、1.39 μm の OH 基損失を低減させる方法として提案されてきた⁽¹²⁾。そして損失増現象が発見された以降も、経時変化を抑えるための有力な方法として検討が行われ⁽¹³⁾、現在では長期安定性を確実に保証する方法として確立している。

最後に、千載一遇のチャンスに恵まれて本現象の発見から対策の確立まで主体的にかかわることができた当事者として、感想を二つ述べてこの物語を締めくくりたい。

第 1 に、本現象の発見は筆者の研究生活において最も刺激的で心が躍る出来事であった。実用の観点からは光ファイバ通信にとっての最大の障害であり、歓迎すべき現象ではなかったが、学術的には極めて安定と考えられていた石英ファイバにおいて、常温で化学反応が進行するという今まで知られていなかった現象であり、未知への挑戦という意味で実に魅力的であった。NTT 及び電線メーカーの多くの仲間とともに原因究明と防止策の確立に成功し、学術面と実用面の両方でプライオリティを確保できたことは、研究者冥利、技術者冥利に尽きるといっても過言ではなかった。技術者の立場からは、完全な対策を確立するまで全ての発表を控える必要があり、一方研究者の立場からは、新規性のある知見やデータが得られれば一刻も早く発表したいという葛藤の中で悩んだが、この相反する要求のはざまの中で何とか両者を妥協させることができたと考えている。

第 2 に、1 年半の検討期間において結果を得るのに時間がかかり過ぎたことが最大の反省点であった。これは従来の常識に捉われすぎて常温での化学変化に思い至らず、核心をついた実験を行うのが遅れたためであった。新しい現象を目の前にして、柔軟な発想で様々な可能性を考える能力を発揮することが、研究者としての必須条件であることを思い知らされた貴重な経験であった。若い研究者・技術者の方々も、日ごろからこのような能力の向上を図りながら研究開発・技術開発を推進して頂くことを期待している。

文 献

- (1) N. Uchida, N. Uesugi, Y. Murakami, M. Nakahara, T. Tanifuji, and N. Inagaki, "Infrared loss increase in silica optical fiber due to chemical reaction of hydrogen," 9th Europ. Conf. Opt. Commun., PD Paper 1, pp.525-528, Geneva, Oct. 1983.
- (2) T. Tanifuji, M. Matsumoto, M. Tokuda, and M. Miyauchi, "Wavelength-dependent optical loss increase in graded-index optical fibre transmission lines," Electron. Lett., vol.20, no.1, pp.13-14, Jan. 1984.
- (3) N. Uesugi, T. Kuwabara, Y. Koyamada, Y. Ishida, and N. Uchida, "Optical loss increase of phosphor-doped silica fiber at high temperature in the long wavelength region," Appl. Phys. Lett., vol.43, no.4, pp.327-328, Aug. 1983.
- (4) N. Uesugi, Y. Murakami, C. Tanaka, Y. Ishida, Y. Mitsunaga, Y. Negishi, and N. Uchida, "Infra-red optical loss increase for silica fibre in cable filled with water," Electron. Lett., vol.19, no.19, pp.762-764, Sept. 1983.
- (5) J. Stone, A. R. Chraplyvy, and C. A. Burrus, "Gas-in-glass—a new Raman-gain medium: molecular hydrogen in solid-silica optical fibers," Opt. Lett., vol.7, no.6, pp.297-299, June 1982.
- (6) K. Noguchi, Y. Murakami, and K. Ishihara, "Infra-red loss spectrum of hydrogen molecules in a silica fibre," Electron. Lett., vol.19, no.24, pp.1045-1046, Nov. 1983.
- (7) Y. Murakami, N. Uesugi, K. Noguchi, and Y. Mitsunaga, "Optical fiber loss increase in the infrared wavelength region induced by electric current," Appl. Phys. Lett., vol.43, no.10, pp.896-897, Nov. 1983.
- (8) K. Mochizuki, Y. Namihiro, and H. Yamamoto, "Transmission loss increase in optical fibres due to hydrogen permeation," Electron. Lett., vol.19, no.18, pp.743-745, Sept. 1983.
- (9) K. Noguchi, N. Uesugi, and K. Ishihara, "Hydrogen quantity generated from optical-fibre coating," Electron. Lett., vol.20, no.21, pp.897-898, Oct. 1984.
- (10) 野口一博, 柴田 宣, 上杉 直, 石原浩志, 根岸幸康, "水素の影響による光ファイバ損失増加と光ファイバケーブルの長期損失安定性," 信学論, vol.J68-B, no.7, pp.795-802, July 1985.
- (11) 朝日新聞, "情報多重列島 — 4 — ニューメディアの担い手," 1984 年 1 月 8 日朝刊.
- (12) 例えば, J. Stone and C.A. Burrus, "Reduction of the 1.38- μm water peak in optical fibers by deuterium-hydrogen exchange," Bell Syst. Tech. J., vol.59, no.8, pp.1541-1548, Oct. 1980.
- (13) 例えば, F. Freund, "Method of processing high purity low-OH vitreous silica fibers," US Patent 4,685,945, Aug. 1987.

内田直也 (名誉員: フェロー)

1939 生まれ。1962 京大・工・電子卒。1963NTT 武蔵野通研入所、光偏向・光変調デバイスの研究に従事。1976 茨城通研に異動、光ファイバ伝送線路の実用化に従事。1978 工学博士 (東大)。1990 古河電工入社。2004 日本産業技術振興協会入会。2010 産業技術総合研究所ネットワークフォトンクス研究センター研究顧問、現在に至る。

この間、本会関係で 1973, 1983 論文賞, 1986 業績賞, 2000 フェロー, 2010 功績賞。1983 いばらき賞「科学部門」(茨城新聞社)。1985 全国発明表彰「朝日新聞発明賞」。1987 科学技術庁長官賞「研究功績者」。1999IEC 活動推進委員会「運営委員長賞」ほか。IEEE 終身フェロー, OSA (米国光学学会) と応用物理学会フェロー。