



# 夢の電波吸収体、幻の光回路

—— 内藤・水本研究室～電子物理工学科 ——



(左)内藤 喜之 教授 (右)水本 哲弥 教授

ここ内藤・水本研究室には、研究テーマが大きくわけて二つある。一つは電波吸収体、もう一つは光回路である。昨年、東工大の大岡山南3号館にある電波暗室が全面改裝された。これこそは電波吸収体の技術の結晶で、外からの電波はもちろん内からの電波の反射まで防いでしまう魔法の部屋である。光回路のほうはというと、2010年までに、電話会社が光ファイバを各家庭まで引っ張るという計画がある。これはすなわち、近い未来に情報が電気でなく光の形で家庭まで届くことを意味している。そこで必要になるのが電気ではなく光をあやつる回路、つまり光回路なのだ。

なお取材は水本先生に話を伺った。



## ノイズの監獄、電波暗室。

むかしむかし、あるところに、わるい鬼がいました。その鬼はノイズをだしては、テレビにゴーストをつくったり、でんわのこえをとおくしてしまうのです。こまりはてた村人たちは、鬼をたいじしようと、まず鬼をへやにとじこめてノイズをそくていすることにしました。しかし、そのためのへやがありません。……

この世の中にはありとあらゆるノイズがあふれている。このノイズ、とかく悪者扱いされがちであるが、だからといって無視したところで何の解決にもならない。まずノイズを精密に測定することから、よりノイズに強い機械、よりノイズを出さない機械の研究は始まるのである。

今ここに一台のパソコンがあって、これが出すノイズを測定するとしよう。さてどうすれば正確に測定できるだろうか。何しろ周囲にはそのパソコンから発生したもの以外のノイズがあふれているから、まずそれをなくさねばならない。原理的には、測定物以外には電波もなにも存在しない無

限に広がる空間が必要である。しかし現実にそんな空間があるわけがない。そこで電波暗室の登場と相成るわけである。

パソコン（被測定物）が発する以外のノイズをなくすには、まず外からの電波を遮断せねばならない。が、これは簡単。部屋の周りを導体の壁で囲ってやれば、静電遮蔽（せいでんしゃへい）によって完全に遮断することができる。むしろ問題は、パソコンから出て部屋の壁に反射して戻ってくる「第二のノイズ」である。

この反射波については、部屋の内部に電波を吸収する物質を一面に張り付けるという方法をとる。電波吸収体は30MHz～1000MHzの電波（要するに身の回りにあるような電波）に対して、反射率を1%以内に抑えることができるように設計されている。この電波吸収体を天井、壁、ついでに床、いたるところに張り付けて、ようやく電波暗室の完成となる。むきだしになっているのは被測定物と測定機械が置かれた床ぐらいで、測定中は人は部屋の外にいて、小さな覗き窓から室内を覗

きながら機械を操作する。むろん、その窓からも外の電波が中に漏れないようになっている。このように、電波暗室を作るには、かなり細かいところまで神経を注がねばならないのだ。

携帯電話の普及など、ますます電波があふれ、ますます電子機器が精密になってゆく時代にあって、電波暗室はまさに世界で活躍中である。それでは今度は、その電波暗室の内壁を作っている電波吸収体について話を進めてみよう。



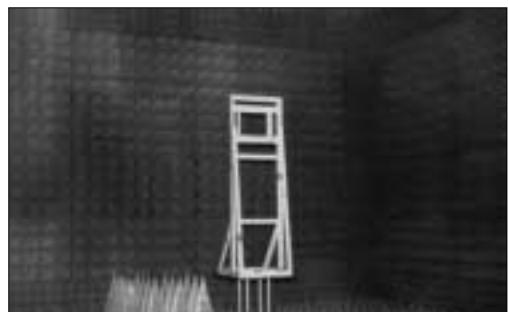
## 究極のダイエット、電波吸収体。

東工大における電波吸収体についての研究の歴史は古く、すでに完成品がいくつかある。しかし最初の電波吸収体（第一世代）は厚さが4メートルもあり、それをいかに薄くするかという方向で研究が進められてきた。ちなみに冒頭でも述べた東工大の電波暗室に使われているのは第三世代のものである。

どの世代の電波吸収体でも、基本の仕組みは電磁エネルギーを熱エネルギーに変換することで電波を吸収する、ということで変わっていない。第一世代の場合その材料としてカーボンが用いられている。電波が飛び込んでくると、導電作用によってカーボン内に電流が生じ、これがジュール熱になる。結局、電磁エネルギーが熱エネルギーとなってカーボンに吸収されたのだ。

しかし、単にカーボンを置いておくだけで電波が吸収されるかというと、そう甘くはない。平面の構造ではどうしても反射が起こってしまう。だから、その形状にも工夫がなされている。

音楽室の壁には、音波が無用に反射するのを防ぐため、小さい穴がいっぱい開いている。平らな壁だと反射してしまうが、適當な大きさの穴があると音はしみこんでいってくれるのである。電波も音波も同じ波であるから、これと同じ理屈が成り立つ。第一世代の電波吸収体は、ウレタン(発泡体などによく使われている)にカーボンを含ませて造っている。ウレタンは、例のごとく穴がいっぱいである。それをカーボンが混ざった溶液につけ、乾燥させれば、その粉だけが表面に残る。カーボンを立体的にあなぼこだらけにして、電波をしみこませやすくするのだ。工夫は他にある。上の



電波暗室（大岡山南3号館）

## 究極のダイエット、電波吸収体。

写真を見て欲しい。電波吸収体の、部屋の内側に向いた部分はピラミッド型をしている。第一世代の電波吸収体の場合部屋の中からは、底辺が50センチ、高さ1メートルくらいの正四角錐が、ずらっと並んでいるのが見える。このピラミッド構造も、電波をスムーズに吸収させるための工夫である。

とりあえずこれで電波吸収体は完成了。が、この世代のものはベースとなる部分の厚さが3メートルもあり、ピラミッドとあわせて4メートルとなる。そうすると、部屋の内側にピラミッドを並べて電波暗室を造るにしても、中の自由な空間はいちじるしく狭くなる。あるいは外枠を非常に大きくしなければならない。これは場所と金と労力の無駄である。というわけで、それを薄くしたのが第二世代の電波吸収体。こちらはベースとなる部分にフェライト（強磁性体）を用い、ベースの厚さを1センチ以下にしてしまった。これで合計130センチ、だいぶスリムになったものである。その秘密はメカニズムの違いにある。電磁波がフェライトにぶつかると、電磁波は二手にわかれる。ひとつはフェライトの表面で反射し、もう一方はフェライト内部を通過して、その背後にある導体によって反射し、再びフェライトを通過して戻ってくる。この二つの反射波はちょうど位相がずれていて、互いに打ち消しあう。完全に打ち消しあうには二つの波の強さが同じでなければならない。フェライト内部を通過する電磁波は、フェライトの持つ磁界に対する抵抗によって弱められ（磁性損失）。これがフェライト表面で反射した波と同じ大きさになって、全体として反射波はほぼ完全

に消失するのである。

そして第三世代。といっても、今度は別に材料が変わったわけではなく、やっぱり同じフェライトである。が、形状が違う。今度はフェライトの板に四角の穴をあけ、格子状にした。なんとそうすると、厚さは2センチのこの部分だけでいいというのだ。ただし、1000MHz以上の電波に対してはこれだけでは不十分だそうで、高さ40~60センチのピラミッドを付けて完璧になる。それでも第二世代に比べたら半分以下である。現代のダイエット熱はすさまじい。

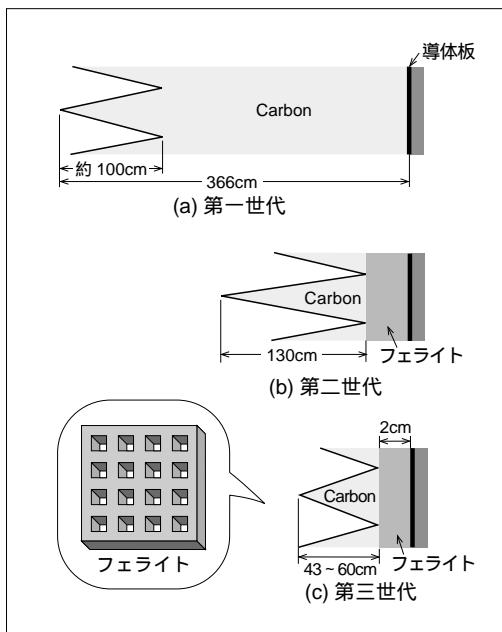


図1 電波吸収体の進化



## 情報の高速化、光回路。

1960年、世界に初めてレーザーが誕生した。1966年に光ファイバの実用可能性が示され、1970年には最初の低損失単一モード光ファイバが完成している。この光ファイバによって、情報が電気でなく光のかたちで世界を駆けめぐる時代が訪れた。そして今、光回路の研究が進められている。

光回路という言葉を聞いても、電気回路と何が違うのか、疑問に思った人がほとんどだろう。それは文字どおり光と電気の違いによるわけだが、ではそのふたつの違い、そして光を用いるメリッ

これまですべて完成品の話であった。それでは今はどのような研究をしているのだろうか。お伺いしてみたところ、厚さを薄くするという方向での研究はとりあえず第三世代で終わりで、今の研究テーマのひとつは、いかに手抜きをするか、だそうである。……なんだか聞こえがよろしくないが、無駄な労力を減らすことができるなら、資源や資金の節約にもつながる。具体的には、電波の反射率を1%に抑える必要が本当にあるのか、電波吸収体はびっちり隙間なく並べなければならないのか、などの研究である。答えはノーで、1%以上の反射が起こっても、測定値の誤差がある範囲内に抑えることができるなら、それで十分なわけである。また電波吸収体の構造を工夫すると、吸収体どうしの隙間が少しくらいあっても、反射率が大きくなるのを防げるそうだ。

研究テーマは他もある。フェライトの板に穴をあけて格子状にした第三世代だが、この横なり縦なりの部分片方だけをさらに削って縞模様にすると、より広い範囲の電波を吸収できるというのである。ただし、これは縞模様に対し垂直方向に電界が振動する電波しか吸収できない。一般に電波はあらゆる方向に振動しているから、これでは都合が悪いように思える。しかしテレビで使われている電波は水平方向だけに振動する水平波だから、それに対してはこれで十分なのである。このような電波吸収体をビルの外壁に貼り付ければ、テレビのゴーストを消すことができる。

めでたし、めでたし。

トは何だろうか。

電気信号は、電線で送信される。光信号（レーザー）で電線にあたるのは、光ファイバである。電線ならば電気が、光ファイバならば光が、波（パルス）を作りその中を伝わって、情報を伝達する。光の作るパルスは電気のそれに比べてノイズに強く、エネルギー損失も少ない。しかしいばんのメリットは、なんといっても情報伝達速度がずっと大きいことである。例えば光ファイバを使うと、それ一本で電話約25000回線ぶんの情報

を一度に送ることができる。

おや？と思われたかもしれない。実は電気信号も光信号も、パルスが伝わる速度は大して違わない。ではなぜ情報伝達速度が違うのか。それはパルスを形成する波の振動数の違いである。電話回線の電気信号で用いられる電波の振動数は2～20GHz。一方、光信号を作る半導体レーザの出す光は200THz（テラヘルツ）。10000倍以上の開きである。0,1,0,1…というビットを電波や光のあるなしで作って信号にするわけだが、例えば電話の場合、ビット一つ一つは約十万個もの波から作られている。従つてビット一つを作るには波の個数÷振動数だけの時間が必要になる。仮に一つのビットを作るのに必要な波の個数が光も電波も同じだとしたら、光は電波に比べ振動数が大きいので、それに要する時間が少なくてすむ。実際にはこれほど単純な話にはならないが、このようなわけで単位時間当たりの情報量は光の方がずっと多いのである。

"Fiber to the home." 光ファイバを各家庭まで引っ張ろうという計画が進行中である。これによって、家庭における情報量の増大および情報の高速化がぐっと進むのは必至であろう。しかし現段階で光ファイバを各家庭まで引っ張っても、きっと期待したほどには情報の高速化はできないとみられている。それというのも、光で送られてきた情報を、今は電話回路で処理しているからだ。

電話を例にとってみよう（図2）。今現在、光ファイバ化されているのは電話局と電話局を結ぶ幹線の部分である。電話局から各家庭までは電線になっているが、これを光ファイバにしようというのが先述の光ファイバ化計画だ。しかし肝心の、幹線と各家庭の光ファイバをつなぐ部分は電話回路のままなのである。

いま、大阪のA, B, Cさんがそれぞれ東京のD, E, Fさんに電話をかけた。その情報は大阪の電話局に集められ、光ファイバで東京の電話局に一度に送られる。さて、東京の電話局では、さっそくまとめられた情報を宛て先（アドレス）ごとに振り分けなければならない。それには信号のうちアドレスを示している部分を認知し、それを読みとり、さらにそのアドレスにしたがって情報を振り分ける技術が必要である。現在ではそれを、1光信号をいちど電気信号に変換し、2電話回路でア

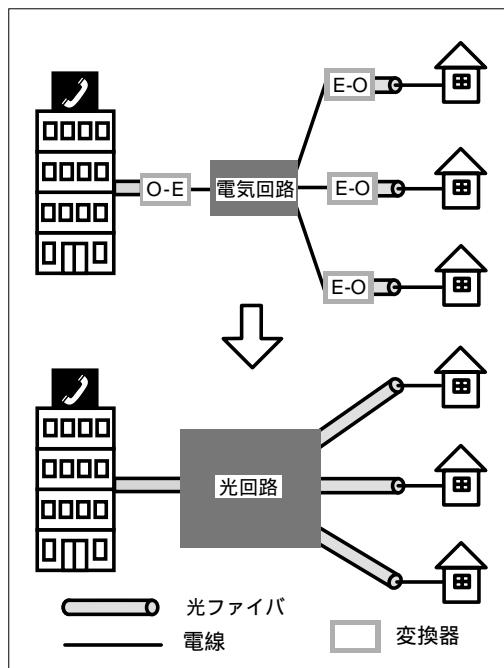


図2 光回路になると…

ドレスを読みとて振り分け、3ふたたび電気信号から光信号に戻して送信するしかない。これではあまりにも面倒である。そしてせっかく光信号にしたのに、この二つの変換と電話回路によって速度に制限がかかってしまっている。何とか光信号を光の形のまま処理して、新鮮なうちに各家庭まで届ける方法はないものか。そのニーズに応えようというものが、すなわち光回路の研究テーマのひとつである。

さて、長所ばかり語ってきた感のある光回路だが、やはり短所もある。光信号はエネルギー損失こそ小さいものの、信号処理に必要なエネルギーは電話回路に比べ非常に大きいというのが現状である。それにまだまだ単純な回路しか実用化されていない。また、もし光回路でコンピュータに使われているような論理回路を作ることができたにしても、それにメリットがあるかどうかはまた別の話である。人が接するような最末端の部分は、電話回路で十分なのかもしれない。情報を大量に、かつ高速に扱うようなところこそ光回路の本領発揮となるだろう。でも、光回路なら何十、何百台のコンピュータの並列処理が可能かもしれないなどと聞いてしまうと、どうしても夢は膨らんってしまう。



## 光の一方通行、アイソレータ。

L S I (大規模集積回路)に代表される集積回路を、知らない人はきっと少ないだろう。知らない人でも必ずどこかでお世話になっているはずだ。計算機でもワープロでもパソコンでも、手近なものを分解してみよう。薄く平べったい黒い箱からムカデみたいに幾本も足を生やしたものがあるそれが集積回路だ。集積回路とは抵抗、コンデンサ、ダイオード、トランジスタなどの各素子を一つの基板や半導体チップの上に集めたものを指すわけだが、現在、光回路についてもそれと同じ試みがなされている。

先生の研究室ではアイソレータという素子について研究している。光ファイバ通信では光の発振器として半導体レーザを用いているが、その際、ファイバと様々な光部品の接合部分などから必ず光の反射が起こる。これらの反射光は半導体レーザにとって大敵である。というのも、反射光が入射すると、途端に動作が不安定になってしまふからだ。そこで、この光が戻ってくることを防ごうというのが、光を一方通行させる素子、アイソレータである。電気回路におけるダイオードのようなもの、と考えてよいかもしれない。アイソレータはま

だ研究中で、完成品が誕生するにはもうちょっと時間がかかりそうだ。完成品ができれば後は基板の上に載せるだけ、と言ってしまえばそうなのだが、じつはそこに大きな問題があった。

電気の集積回路の基板はシリコンの薄膜結晶である。しかし光回路の場合には、そう都合のいい基板がない。半導体(レーザー)の結晶と、アイソレータを作る磁気光学材料ではまるで性質が違うからである。例えば融点が数百度も違うし、結晶単位格子の大きさも違う。だからここで「二つの異なる」結晶をぴたりとくっつける技術が必要になる。くっつけるといっても、光回路は結晶の厚さの単位がミクロン( $10^{-6}m$ )という世界であるから、接着剤を使うわけにもいかない。そこでいま、異なる結晶をくっつけることに対して二つのアプローチがなされている。

ひとつは、異なる二つの結晶を一つの基板の上で成長させるという方法である。アイソレータをつくる結晶と半導体結晶、二つの単位格子の大きさの差は約二倍である。そこで、両者の間に緩衝体となるものをうまく挟みこんで、それを基板として異なる結晶を成長させようというものだ。ただし、その緩衝体は両者ともきちんとした結晶が成長するものでなければならない。それを見つけるのがまた問題ではある。

上の方法に対して、二種類の結晶をそれぞれ成長させてから後からそれを直接くっつけようというのが、次に説明するダイレクト・ボンディングという方法である(図3)。まず先の二種類の結晶を用意する。両者の表面を適当な液体で処理すると、OH基を腕にして二つは結びつく。さらに加熱して脱水、脱酸素で完成である。この方法によると、結晶成長の制御が比較的簡単にできるという長所がある。

実を言えば、「似た者どうし」の異なる結晶をくっつけるという話は、すでにあちこちで研究がなされている。しかしこのように全く性質が異なる二つの結晶をくっつけようという試みは、まだ数少ない。この研究室は、本当に最先端のひとつ先を行っている。

(尾島 邦明)

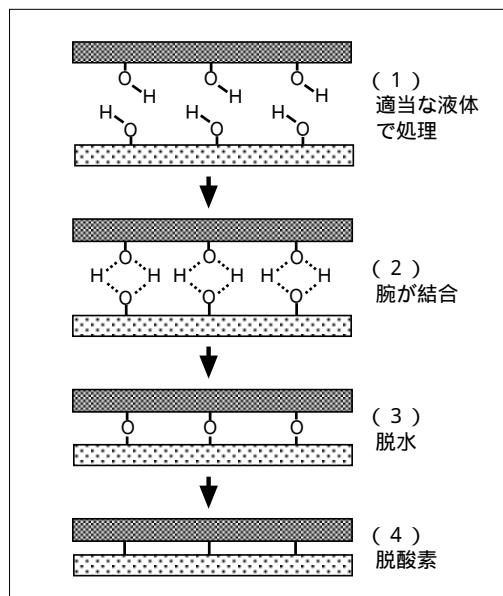


図3 ダイレクト・ボンディング