私の中の古いものと 新しいもの —師と友のことば—

川上彰二郎 (名誉員)

東北大名誉教授、(株)フォトリニクスファウンダー、(公財)仙台応用研理事、東大・工・電気卒、東北大学教授を経て2002から(株)フォトリニクス、ミリ波、光ファイバ、マイクロブティクス、フォトリニクス結晶の研究開発と実用化に従事。本会功績賞など受賞。最近の活動に対し今年井上春成賞を受賞。本会元副会長、IEEE Life Fellow。

川上彰二郎
Shojiro Kawakami

1. はじめに

私のキャリアでは幾つかの転機がありながらもずっと道なりに技術の追求をやってきた。道の分かれ目はそれぞれ皆技術的な発見と結び付いているので技術的な説明を交えながらお話しする。

本稿は主に三つの部分でできている。

(1) 修業時代 [大学院学生の頃]

私が大学院の博士課程を修了したのは1965年である。第2次世界大戦中に小学校に入り(1943年)、戦後の復興期から池田内閣の所得倍増計画に代表される高度成長期にかけて大学生・大学院生の時期を過ごした。日本はまだまだ貧しかったが、周りの社会や電子工業は急速にキャッチアップ中だった。(カラーTVの本放送、東海道新幹線の開通、東京オリンピックなど皆その頃。)その頃の大学の雰囲気、大学院学生の成長を記す。

(2) 光ファイバ時代 [東北大学]

1965年春に東北大学に採用されてから定年退官するまでずっと、光ファイバ、光部品の研究開発を仕事としてきた。自分の働き盛りに光エレクトロニクスの技術と産業が大きく飛躍する時期と巡り会うことができた。

(3) フォトリニクス結晶時代 [東北大学から会社のスタートアップへ]

東北大で数十年たって大学教師生活の終わりが近づくと、三次元フォトリニクス結晶作製の工業的なプロセス技術を見つけた。それにほれ込み、技術を

実用化する会社を作って技術開発と経営に努めた。大学教師がビジネスに当たるといのは珍しいケースかもしれないが、応用がいろいろあつて産業展開の本命を絞れない以上、技術は自分で育てるほかはないと思い、会社を作って12年になる。今は企業経営の肩の荷を半分下ろしてもう一度基礎的な開発、研究に力を入れている。

以上の三つが具体的な主題となる。むすびでは、科学や技術には元々古典的な取組み方を好み、発見の喜びや、賢い人たちがびっくりしてくれる快さを報いと考えたい自分が、技術を利益の源泉としている今の社会、実利実益を飛び切り重視するこの世の中でどう学習し適応してきたのか振り返る。

2. 大学院学生の頃

東京大学の大学院学生だった頃(1960~1965年)指導下だった岡村総吾先生(1918~2013年)はマイクロ波、ミリ波、電子管を専攻されていた。当時の岡村研究室では電子ビームとホモダイン検出方式を応用したマイクロ波計測技術が二本柱だった。研究指導の面では、大学院学生、特に博士課程の学生は自分でテーマを見つけて道を切り開くのがベストというお考えだったと思われる。学生を使って御自分の研究成果を上げようというのではなく、学生が自力で伸びるのを喜んで下さった。その意味で大越孝敬先生(1932~1994年)は模範だった。私が岡村研究室の卒論を経て大学院に進んだ頃大越先生は博士

課程を終えて助教授になられたので、私からは半年だけ「大越さん」だった。その博士論文は電子ビームの陰極前面の電位最小面が雑音低減に及ぼす効果に関するもので、岡村先生はこの仕事について「ほとんど指導らしい指導はしていないような気がする」と書いておられる。卒業研究の後、修士課程、博士課程では研究室の計測技術のうち、ホモダイン変調復調によってミリ波の高感度な測定系を作ることを研究した。その枠組みの中で変調・復調に自分のアイデアを盛り込んだ新機軸を着想、実証した（中身は省く）。一応のオリジナリティは認め得るが、クレバーなアイデア以上ではないかもしれない。

研究室の関連の活動では電子ビーム懇談会^{*1}が月1回くらいのペースで開かれていた。電子ビームは専攻外だったが、会に出席して独り立ちの研究者が電子ビームやパラメトリック増幅などを討論されている空気に触れていた。大越先生に倣って岡村先生の羽根の下テーマから自力のテーマに踏み出したいと願っていたが、博士課程の最後の年にそれが少し実現できた。

博士課程の研究の中でホモダイン変調の実験をするとき、ミリ波（34 GHz, 68 GHz）変調に使っていた素子の性能が当時の技術水準では不十分だった（バイアス電圧によるインピーダンスの変化幅が狭いなど）。具体的にはマイクロ波ではバラクタ接合ダイオード（可変容量ダイオード）、ミリ波では半導体と金属針ウィスカの点接触ダイオードが可変インピーダンス変調用素子だった。点接触ダイオードの不安定さはもう一つの難物だった。変調能率を高める目的で、可変素子の前後の回路の設計で素子性能をどこまで引き出せるかをゼロから考え始めたが、手元に見付かる文献は皆つぎはぎ的、散発的、紀行文的だった。そもそも私の問に答える一般的な理論はなさそうだ、自分で作るほかはないという状況が見えてきた。図1(a)において、「与えられた周波数において、手持ちの可変素子を二つの複素インピーダンスの値（ Z_1 , Z_2 ）を往復するものと表す。そのような（ Z_1 , Z_2 ）の『良さ』を定義できるだろうか？」という問を立て、答が見付かったのがひよこにかえる端緒だった。

答は次のようになる。任意の無損失リアクタンス

^{*1} 私が大学院でミリ波計測技術の研究をしている頃、岡村先生、大越先生や東大生研の齋藤成文先生、浜崎襄二先生、東工大・日電公社・東芝・日立など諸大学諸企業のエース級の研究者が齋藤先生と岡村先生が設立された「電子ビーム懇談会」でマイクロ波電子管やマイクロ波パラメトリック増幅器を勉強していた。メンバーの研究成果、新着の重要論文やプレプリントの紹介・検討などが主だった。運営費・名簿・記録・会則は多分なし、各組織の会議室や時には保養所を会場に時間外や休日集まっていた。

2 開口回路（4 端子回路、2 端子対回路とも言う）の二次側を（ Z_1 , Z_2 ）で終端し、一次側から見たインピーダンスを（ W_1 , W_2 ）とすると、変換するリアクタンス回路がどんなものであろうと

$$M = \left| \frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2^*} \right| = \left| \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2^*} \right| \quad (1)$$

という関係があることを見付けて、不変量 M を「良さの指数」と定義した。（記号 $*$ は複素共役を表す。なお、リアクタンス回路による変換には、いつでも逆変換リアクタンス回路がある。） M は 0 と 1 との間の量で、大きいほど「良い」。例えば、常に $1(\Omega)$ で可変度ゼロの素子の良さの指数はゼロである。

例えば、次のクイズを考えて下さい。

問：第1の可変素子は、 $1(\Omega)$, $10(\Omega)$ を往復し、第2の素子は、 $1 + j1(\Omega)$, $1 - j1(\Omega)$ を往復する。どちらの素子が「優れて」いるだろうか？

答： $1(\Omega)$, $10(\Omega)$ のペアなら $M = 9/11 = 0.8181\dots$ となる。 $1 + j1(\Omega)$, $1 - j1(\Omega)$ のペアなら $2/2\sqrt{2} = 0.717\dots$ となる。よって $1(\Omega)$, $10(\Omega)$ のペアの方が優れている。

この発見を手掛かりに、一般の2状態可変回路の理論を作ることに努力した。博士課程3年次は普通それまでの研究の仕上げに使うのに、大幅に路線違いのテーマに春から秋までの半年をつぎ込んで、数理をしっかりした体系にまとめることができた。体系とは、例えば、次のような問があるとして、それに答えられる、できるだけ一般的な命題を予想し証明しておくことである（図1(b)を参照）。

「作りたい回路の『良さ』を何らかの方法で定義できて、手持ちの可変素子（複数）の良さの指数と見比べて合成の可能不可能を判定できたら便利だろう。そのような計算は可能だろうか？」

答は肯定的で、ポイントは概略次のとおり：作り

図1 2 状態可変インピーダンス（例えば可変容量ダイオード）や可変回路と外界との間に無損失変換回路（ L , C など）でできた回路）を入れて別物に変換する操作
(a) 変換の一番シンプルな例。
(b) 一般的な変換の形。

たい回路のインピーダンス行列を $(Z_1 - Z_2)$ とし
て (ただし太字は行列を表す), それから式 (1)
によく似た行列

$$M = (Z_1 - Z_2)(Z_1 + Z_2^*)^{-1}(Z_1^* - Z_2^*)(Z_1^* + Z_2)^{-1} \quad (2)$$

の固有値を求め, その平方根 $m_1, m_2, \dots$ を手持ち
の素子の良さの指数と比べれば, 回路合成が達成可
能か不能か判定できる. 繰り返すと

「合成の可能不可能を判定したい」→そのために
はどういう定理が必要か予想する→予想は正しいか
検証する

という作業が必要になる. 要するに, n 開口の可変
回路を $(m + n)$ 開口のリアクタンス回路に埋め込
んで新たに m 開口の可変回路を作るという変換に
ついて言える命題を予想し証明することに帰着す
る. その間は数理解析に明け暮れた. その後, 今日
までの長年の研究者暮らしを通じて, 大仕掛な数理
解析をするための私の (力量+気力+体力) のピー
クはこの頃だった. その集中を支えるメンタルなよ
りどころは岡潔語録^{(1), (2)} と岡先生の気迫だっ
た*2. 我ながら大変な張り切りようでおかしいが,
戦争の 10 年, 15 年後の活気があり, 混んとし
ていた世の中で, 大学院学生はみな背伸びをしてい
たのです. 身の程知らずの元気を持つことは進歩の
原動力になることもある.

「良さの指数」の理論が大体できかかった頃, 岡
村先生はその概要を電子ビーム懇談会で発表するよ
う勧めて下さった. 論理の一環が未完成だったの
で, 恐る恐る発表したが, 予期以上の好評で, 齋藤
先生は, 「ここまでで既に価値がある, 未完成部分
は『予想』でよい, すぐ発表しなさい. 証明は誰か
ほかの人がやってくれるよ」と熱した口調で激励し
て下さった. (未完成の部分とは次のことである.

*2 多変数解析関数理論で時代を画する業績を上げた数学者岡潔⁽³⁾ の
エッセイ集がその頃(1963年以後)次々に出版され広く読まれた. 数学,
芸術, 人生を論じ, 研究を行う自己の心理解剖が豊富に盛られていた.
若い読者に奨めたい. 本誌で私の回想記に許されるページ数のうち, 本
当なら私の執筆分のページ数をうんと圧縮し, 残りを全部岡先生の文章
の再録に使いたいくらいだが, それは現実的でない. 代わりに私が最も
感銘を受けたところと, 做って実益があった, 研究が進んだ部分を 2,
3抄録する.

・「数学なんかをして人類にどういう利益があるのだと問う人に対して
は『スマレはただスマレのように咲けば良いのだ, 春の野に影響があ
ろうとなかろうと』と答えてきた」
・「すべて学習は早すぎるより遅すぎる方がよい. これが教育の根本原
理だと思う」
・「前頭葉の画布に情緒が無形の総合像に描かれてゆく有様は, 朝霧の
うしろの山の姿がだんだんあらわれてくるのに似ている. そこが少し
あらわれ, かしこがすこしあらわれ, そこかしこが少しずつあらわれ,
そこが少しはつきりし, かしこが少しはつきりし, そうしている中に
だんだん全山容が浮き出してくるのである」
・「机に向かって, 本を見ながら, 演算しながら勉強するのをやめて,
散歩しながら心の入り口でやると良いのである」

「 n 開口 2 状態回路が二つあって, それぞれの式 (2)
に相当する行列の固有値 $a_1^2, a_2^2, \dots, a_n^2$ と $b_1^2,$
 $b_2^2, \dots, b_n^2$ とが一致するとき, その二つの 2 状態回
路は適切な $2n$ 開口リアクタンス回路を選んで必ず
相互変換できる」という予想を証明すること.)

この研究を進めている途中で, 誰かが先にやって
いるかもしれない, 知らないのは自分だけかもしれ
ないと不安も感じていたので, この会で認められて
安心感を味わった. この研究を翌年 IEEE の回路理
論 Transaction に発表できた⁽⁴⁾. この研究は独力で
やった研究には違いないが, 電子ビーム懇談会の研
究者の議論に何年も耳を傾けるうちに研究のセンス
やノウハウを空気伝染的に吸収していたのが大きい.

これが私の学界へのデビュー論文と言ってよいだ
ろう. 文学者の第一作は作家の全貌を萌芽の形で示
していることが多い. 同様に, その頃の博士論文に
はそれだけの重みを私たちは意識していた. 1990
年頃からだろうか, 大学院後期課程の定員が増えて
博士号取得者が大いに増えているが, 質は低下して
いないか検討を要する. 今の大学で, 博士論文を提
出するには「学会誌論文が 3 編以上必要」とかの基
準があるとよく聞く. 余り楽しくない話である. 第
二列の研究者を量産するには適しているがゆくゆく
第一列に加わるべき研究者の卵を第二列に促成栽培
してしまうことが心配になる. 私自身教師をしてい
たので立派なことは言えないが, 博士課程の学生
が, 結果が予測できるテーマで, 簡単に言えば水道
の蛇口からバケツに水をくむ労働を教授に命じられ
ているのでなければ幸いだし, 学会誌論文採録の水
準が下がっているのではないことを願う.

博士 3 年の夏はこのように過ぎたが, 大学院修
了後の勤めを決める時期でもあった. 東北大学の喜
安善市先生が岡村先生を訪問され, 電気通信研究所
の西澤潤一先生の下で働く人はいないかと打診され
た. 証明の未完成の部分はどうアタックするかで頭
が一杯という状態だった. ほかの就職の話もあった
ので迷ったが, 岡村先生は「君は半導体の知識が乏
しいことが不安のようだが, 何とかなるよ. 学問的
に力のある先生のところへ就くチャンスを生かすの
がよいんじゃないですか」とおっしゃられ, 決心し
た. マイクロ波からは遠い研究室に決まったので,
この研究は手土産にならなかったが, 「何でも一所
懸命やればそのうち何とかなるだろう」という楽観
主義を土産に東北大の門をたたいた.

余談ながら, この研究は何年かたって思わぬとこ
ろで私が尊敬する何人かの方々が評価して下さい
ました. 例えば内藤喜之さん (私と同世代, 東工大教

授、後に学長、故人）は大のサポーターになって下さり、仕事に注目し様々な機会に話題にして下さった。はるか後年、あるマイクロ波の国際会議の基調講演で、この研究論文を“one of my most favorite papers”と紹介されたことなど、私などは仲間に対してつい競争心を抱いてしまうのに、内藤さんは心の広い方だと敬服している。

3. 東北大学に移って…… 光ファイバとの縁

西澤潤一先生が東北大学を卒業された1948年はちょうどトランジスタがベル研で発明された年でもある。先生は半導体を専攻され、直ちに半導体の全分野でたくさんの研究、特許出願をされた。並行してその特許を生かした財団法人半導体研究振興会と付属の半導体研究所を設立し活躍されていた。卓越した業績と半導体の将来への産業界の大きな期待とが相伴ったものであろう。

私が東北大に移った頃、先生は38歳か39歳の若さでありながら東北大の研究室と半導体研究所のメンバー合わせて50人強の大所帯を経営しておられた。岡村研究室ではメンバー全員で10人内外であり、研究は「君子の知恵比べ」的、時には「真剣な遊び」の要素さえあったが、西澤研究室では戦いとしての研究という雰囲気を感じた。グループは産業界に対して研究成果を挙げ続けることを義務付けられていたのではなかろうか。その研究室の助手には戦力になることが職務だったという印象を持っている。

その頃の鮮明な記憶がある。ある日、西澤先生から何の研究がやりたいかのお尋ねがあり、たまたまその頃興味を持っていたことを挙げて、かくかくしかじかに興味がある、何よりも研究として面白そうだから、という意味のことを御返事した。直ちに厳しく「君はアインシュタインか？ アインシュタインなら自分の興味に従って研究すれば世の中の役に立つ。凡人は何よりも“役に立つ”ことを考えるべきだ。世の中は君に好き勝手な道楽をさせなければならぬ義理はない。君の提案はどう世の中に役に立つのかははっきり言えるのか」と言われ、出直す羽目になった^{*3}。よく考えたが、悔しいけれどこの集団ではこれは論破できない、世の中に役立つことが第一

^{*3} 原稿を読んで頂いた高瀬正仁教授（九州大学）から次のコメントを頂いた。

（1955年頃来日し、若い数学者たちから“神のごとく”（岡先生の表現）尊敬された数学者）アンドレ・ヴェイユは、日本のワンダーボーイたちに、数学の研究について「まずガウスのように始めなさい。すると自分はガウスでないとすぐに悟るだろう。それでいいのだ、とにかくガウスのように研究しなさい」といった由。

だと宗旨替えした。というより、工学系ならばどこでもこれは否定し難い。そして、自分のような性向の人間が産業社会で研究を仕事として、しかも元気に生きるためには、産業的に有益で同時に自分には十分面白いことを見付けるほかはないと悟った。

その頃、ガラスの光学繊維（光ファイバ）を研究するように、との指示を頂いた。その少し前に西澤先生が発案し、佐々木市右エ門さんが書いた（のだろう）特許出願（1964-11-12）の請求範囲は「比較的屈折率の大きな材料と、比較的屈折率の小さい材料を組み合わせる部分を少なくともその一部として含み、その部分に光を集めて表面における光の損失を減少させることを特徴とする光の伝送・変換方式及び装置」で、境界をなだらかにしたのがその分割出願（1965年）である。

久し振りに明細書を読み返したが、この特許は問題解決より提起に比重のある出願であることが感知される。コア・クラッドからなる多モード光ファイバでコアとクラッドの境界をばかせば新しい有用な特性が得られるという見通しと、有用な特性を見付けるのだ、という強い意志がある。そこで提起された問題を発展させることが私のミッションであろうと理解して研究を始めた。とはいえ手掛かりがなく、IEEE や BSTJ (Bell System Technical Journal) の論文、喜安先生から頂いた英国 STL (Standard Telecom. Labs) の論文を読んだり自分で解析したりしていた。そのうち西澤先生、喜安先生のお力で大阪工業試験所から直径1mmの光ファイバ（ロッド）の試作品を頂き光を通して見るなど、実質的な研究が少しずつできるようになった。

私が光の研究に入った1965年前後の光エレクトロニクスの情勢を振り返ってみると、その前には

- ・1960年 ルビーレーザー（最初のレーザー）
- ・1962年 半導体レーザーの低温・パルス動作
- ・共焦点共振器とガウシアンビーム理論

などがあり、5年後の1970年には半導体レーザーの常温CW動作＋低損失光ファイバ出現、という大きな出来事があった。1965年頃は今の目で見て光ファイバ伝送路の研究開発が水面上・水面下で繰り広げられていた。水面上ではノーベル賞をもたらした低損失光ファイバの提唱（Kao, 1966年 英国 STL）が著名である。

重要なものには、手持ちの手段が十分であろうとなかろうとまず着手し文字に残さないと何事も始まらない。岡潔先生は、十中八、九は解けないが不可能とは言いきれない問題にこそやる気が生まれるという⁽²⁾。

同じ頃、電子ビーム懇談会を少し大がかりでフォーマルにしたような集まりに、西澤先生が主宰された科研費総合研究「固体による光の超高速制御—光計算機の基礎研究—」がある。半導体レーザと光通信の応用を、現状技術の制約に余りとられないで広く検討する集まりだった。西澤、喜安、後藤英一（東京大学、パラメترون計算機で有名）の先生たちが活発に議論をリードされていた。その集まりで、光学ガラスを原料に二重るつぼ法で作った前述の光ファイバの損失（約1 dB/mという大きさ、吸収も大きく散乱も大きかった）を私から報告したことがある。作製下だった大阪工業試験所の方も同席しておられたが、損失が大きいことについて「低損失化のために材料の精製スペックを極端なものにすることはあり得ない。ガラスを溶かす耐火レンがは不純物だらけ、高価な白金るつぼを使ってもガラスに白金が溶け込む、高純度化には限度がある。そもそもガラスには重さ当りの常識的な価格もあるし」との御意見だった。後藤先生が即座にいわく「半導体プロセス用のシリコン有機化合物を燃やせば純粋な石英ガラスができる。世界一損失の小さいファイバを作れば光ファイバが同じ重さの純金の値段で売れますよ」。感服した。喜安先生は戦時中の国内の通信システムの不安定さに悩まされた経験をお持ちで、「世の中では光伝送路としてレンズ列が損失の小ささから有望候補とされている。しかしレンズ列は安定性という根幹的性質に欠けていて可能性はゼロである。ガラスファイバは損失は大きいですが、研究でどれだけ低損失化できるかは可能性 x （エックス）である。ゼロを研究する意味はなく、 x は研究に値する」という判断をお持ちだった。世の中は数年後そのとおりになった。

前記の特許が主張するように、コアとクラッドの界面をなだらかにすると光の伝送損（散乱損）が本当に減少するか確認する計算は複雑になってしまい2年くらい難航していたが、あるとき、損失うんぬんを大きく離れてパルス波形伝送の観点から考え始めた。多モード光ファイバで軸上を伝わる光線と、端面に入射する角が大きくファイバ内をジグザグ進行する光とを考えると軸上の光線の方が速く、ジグザグ光は遅く、パルス状の光は波形が広がり劣化することは知られていた。コアとクラッドの界面をなだらかにすると状況はどうなるだろうかという疑問である。

図2(a)、(b)を参照して下さい。多モード光ファイバでは波動方程式を解かなくても幾何光学で現象の見通しをつけることができる。2層ステップ構造

では、端面に角度 θ で入射する光は角度ゼロで入射する光に比べて光路が $1/\cos\theta$ 倍長くなるので信号の伝搬時間も $1/\cos\theta$ （ $=1+\theta^2/2$ ）倍大きくなり、光パルスに入射角の広がりがあるとパルス伝送特性が劣化する。一方、屈折率が半径 r の緩やかな関数であるとき（ただし集光するため中心で最大）光線はジグザグでなく蛇行するようになる。蛇行する光線が軸と角度 θ で交差するとき交点付近では前と同じく光線の局所的速度の軸方向成分は $\cos\theta$ 倍になる、つまり遅くなる。問題は光線が軸から離れて軸とほぼ平行に進むときである。その点で屈折率は中心軸の値より小さくなる（ $\cos\theta$ 倍になる）ので、光線の軸方向の局所的速度は $1/\cos\theta$ 倍になる、速くなる！うまくすれば軸に沿う光線と走行時間を同じにできるかもしれない、と気付いた。

具体例として屈折率の二乗が半径 r の二次関数になる光ファイバではどうなるか計算すると、蛇行する光線の単位長さ当り遅延は、

$$\frac{\text{蛇行光の遅延}}{\text{軸上直進光の遅延}} = \frac{\cos\theta + 1/\cos\theta}{2} \\ = 1 + \theta^4/8 \quad (3)$$

となり1に非常に近いことが分かった。 θ は普通0.1以下なので、ステップ状の2層構造を持つ光ファイバに比べパルス伝送特性が二桁以上改善される。西澤先生、喜安先生にすぐメモを送った。即座に喜安先生から大興奮のメモが返ってきた。こんなに易しいこと（伝送特性の改善）が当時は画期的だった。

その時点で追求すべき課題が二つ見えた。

- ・パルス伝送の最適設計、設計の厳密化（光線モデルから波動解析へ）。多モード分散はゼロにできるか……光ファイバでは中心軸と交差する光線だけでなくらせん状に進む光もある。それらを全部走行時間一定化できるか。更にカットオフに近いモードの特性やクラッドの効果など。
- ・奇妙なパラドックスの存在。光線光学の立場からは、光のパルス波束が、速度が速くなったり遅くなったりしながら運動する。波動方程式の目で見るとどうなるか？蛇行する光パルスは、光ファイバの伝搬モードの r 方向に次数の高いモードの重ね合わせで表されるはずである。それぞれのモードは一定の群速度で長さ方向に進行するのであって、速くなったり遅くなったりすることはあり得ない。一体何事か？

第一の課題は実用上の意味のあるマジョリティ向きの課題であり⁽⁵⁾、第二の課題はパラドックスを見付け、謎を解決するスリルにひかれるマイノリ

図2 多モード光ファイバ内の光線軌跡と屈折率の分布
(a) コアもクラッドも均一な屈折率を持つ。斜め入射する光の光路は折線状になる。軸に沿う速度は一定。
(b) コアの内部で屈折率は連続的に変わり、中心軸上で最大。斜め入射する光は蛇行し、速度は速くなったり遅くなったりする。

ティ向きの問題である⁽⁶⁾。当時の私は両方同時に進めた。時間はそれだけゆっくり流れていた。

この研究をしているときは知らなかったが幾つかの競争が進んでいた。

- ・ NEC, 日本板硝子による二乗分布多モードファイバ (SELFOC) の共同開発 (1969 年)
- ・ コーニング社から低損失光ファイバの発表 (20 dB/km, 1970 年) とそれに続いて世界中、日本中のエレクトロニクスのメーカーや研究機関からの参入

私にとって、研究を通じての世の中との関わりはこの時期に大きく変わった。リアルビジネスと直につながった研究開発の面白さ・厳しさ、特許争いの赤裸々さに触れたのは上の二つの出来事によるところが大きい。人の世はお金の絡むところに実態が現れる。大学も例外ではない。研究に対しての世の中の直の反応には新鮮な魅力があった。

これと前後して、当時の電気通信研究所の先生方のお計らいで、私は西田茂穂先生を上司として新しい研究テーマを考えて実行するという環境に置いて頂いた。当時多モード光ファイバの研究は花盛りだったが単一モード光ファイバの研究をやる人はほとんどいなかった。単一モードファイバの究極の特性は何だろうか考え、日立製作所中央研究所のグループの人たちに議論相手をしてもらいながらゼロ分散化を目指して研究し、結局 W 形光ファイバに到達した。二乗分布の多モードファイバは世界中で使われるようになったし、W 形ファイバも AT&T 系を中心に米国、ヨーロッパで広く役立っている。

光ファイバの理論的な研究は多モード・単一モードそれぞれに二乗形、W 形という答を出したところでひと区切りして次の研究課題として小形の光通信部品に移っていった。その頃教授になりグループに責任を持つようになった。その時期に (発明+研究開発+産学で実用化) したのものにはラミポール、TEC ファイバなどがある。(ラミポールとは誘電体薄膜と金属超薄膜を数十周期交互積層し、端面を研磨した小形偏光子。TEC ファイバは単一モードファイバを局所的に熱処理して正規化周波数を保存したままコア径を拡大し、ファイバとデバイスの結合をしやすいしたもの。二つとも変調器・光増幅器そのほかに広く役立っている。) それらを通じて蓄積したものづくりの経験⁽⁷⁾ が次のフォトニック結晶、自己クロウニングの発見につながっていく。

研究室の実験環境整備が主に白石和男さん (当時助教授。現在は宇都宮大学教授) の力で出来上がり部品研究が軌道に乗った頃、在外研究員として MIT に長期出張する機会を得て (1983~1984 年)、尊敬する H.A. Haus 教授 (1925~2003 年) と共同研究することができた。お人柄を一、二思い出してみよう。

(1) 常に前向きの先生が珍しく回想された Haus 語録:「自分は若いときから、マイクロ波回路、電子ビーム、光エレクトロニクス、固体超音波などいろんな分野をやってきたが研究の手段は根本的に皆同じだ、同じことを異なる対象に当てはめてきた」とのこと。謙遜でも自負でもなく実感だと思う。孔子の「我が道は一をもって (忠恕をもって) これを貫く」を連想する。

(2) Haus 教授が主宰されるセミナーも強い印象を残している。たくさん研究グループから大学院生が集まってきて (時には教授たちも)、未完成、未発表のテーマも議論の対象になっていた。仲間は競争相手でもあるし、集まる中には「手の内を明かさなない」先生も当然いたが、Haus 先生はアイデアを次々と惜しみなく話される。そのことについて「思い付くことのうち自力でやれるのはごく一部分だ。仲間に話して、彼らが面白いと思って実現してくれるなら自分は十分ハッピーだ」とも言っておられた。岡村先生、齋藤先生に通じる君子の姿だろう。

(3) Haus 先生はディスカッション好きで、自説を熱情的に力説される。弘法も筆の誤り、たまに間違っていて相手に指摘されるとびっくりして小考し、すぐに悟って “I was wrong, I was wrong, completely wrong!” と叫ばれるところに何度か遭遇した。学問にこれだけ正直な先生は見たことがない。

4. フォトニック結晶

4.1 技術的なこと

部品研究に転じて15年くらいたった頃にフォトニック結晶の概念を知り、その面白さと実用化への障壁（作製の困難）を乗り越える一つの方法を見付けてそれに熱中したいきさつを以下に記す。

フォトニック結晶を念のため説明すると、複数種類の誘電体でできたナノ構造で、周期が光波長の数分の1の二次元周期構造または三次元周期構造をいう。周期構造自体は古くから研究されているが、ナノ加工技術の進展と1980年代後半に提唱された完全バンドギャップ効果（ある周波数では、空間の全ての方向に電磁波が遮断域に入る）で注目を集めた。当時も今もそのような構造をどう実現するかがポイントとなっている。

1996年秋、英国のランク財団の光ナノ構造のシンポジウムで私たちがやっていた多層薄膜型光部品（ラミポール偏光子）の技術を講演したとき、同じシンポジウムでフォトニック結晶の初期の研究をリードするイギリスの研究者の講演が幾つもあった。そういう面白くて複雑な構造をどうやって作ればよいか、実験室止まりでなく工業製品にできるか、講演を聞きながら考えた。その晩寝床の中で、何と自分の研究室で日常やっているプロセスが使えるのだとヒントを得た。シンポジウムでも話した多層スパッタリングプロセスには悪役が潜んでいる。微細欠陥が形を保ったまま層から層へと伝搬していつまでも消えない現象がある。どういう仕組みだろうかという謎が頭に何年も前から結構深く刻まれていた。フォトニック結晶を作るのに悪役を善用できるだろう、多層周期構造ができるのではないかと考えた。

日本に帰って研究室の皆に話し、実証に取り掛かった。僅か数週間できれいな試作物ができた⁽⁸⁾。図3に作り方の原理を示す。基本形はギザギザを持つ基盤（図4左の白い、やや厚く描いてある部分）の上に2種の誘電体薄膜を交互に積層したもので、面内の周期形状はリッジ&グルーブ、蜂の巣形（六方格子）、正方格子、何

でもよい。積層の基板には作りたい構造に応じてあらかじめ凹凸を通常のリソグラフィーとドライエッチで作っておき、その上に交互積層する。

自己整形の原理は次のとおり：凹凸のある（斜面のある）基板にアルゴンなど不活性ガスのイオンを衝突させると基板がエッチされる。斜面にイオンが衝突するとき、水平に近い面や垂直に近い面のエッチング速度は大きくなく、中間のある一定角 α （通常水平面から $35\sim 40^\circ$ ）の斜面が最も速くエッチされる。感覚的には、エッチングイオンが面を構成する分子を“斜めに削り飛ばす”イメージが分かりやすい。任意の斜度分布を持つ凹凸をエッチすると、中央図の図解のように角度が α に近い部分の面積が広がる。凹凸を与えた基板の上にバイアスパッタ（スパッタとエッチの組合せ）プロセスを繰り返すと図3のように角度が α の部分だけの周期構造が得られる。基本的に断面は定常形状（角度 $+\alpha$ 、 $-\alpha$ ）に自動漸近するので作製の安定性に問題がない……基板の凹凸パターンに微小な揺らぎがあっても積層中に修復されてしまう。フォトニック結晶を工業製品にするのに最適と思った。

また、面の中で多数のサブ領域を設けて各々別の周期性や方位・格子定数を持たせることは下地基板

図3 フォトニック結晶の自己クローニング作製法の原理

図4 自己クローニングフォトニック結晶とそのセグメント化 セグメントをイメージセンサ画素に一致させるとワンショット偏光イメージャができる。

をあらかじめ加工しておくことで自由にできる。厚さ方向の周期も積層の途中で自由に変えることができる。使い道は、その頃研究が盛んだった小形の導波路にも、あるいは今も昔も変わらず基本的に重要な偏光子や波長板とその集積化などたくさん思い付くのでわくわくしながら研究開発を進めた。

この作製プロセス（自己クローニングと名付けた）を見付けて、技術の可能性を更に開拓したいと思ったが大学の定年まであと数年しかなかった。同僚たちの支援を得て、大学の新しい仕組（客員教授など）の適用を受けたり、科技厅やJSTのプロジェクトを獲得して定年後も2、3年開発をした。この作製プロセスは何に使えるか、限界は何か、5年、6年たっても見通せない。そこに私の今までの仕事とは反対の性質、新鮮な魅力を感じた：2状態回路の理論では、考えるべきところは考えたという達成感のすぐ後にやるべきことは終わった、終わってしまったという虚脱感もあった。多モードファイバのパルス広がりや抑制する設計でも主要部分はやったとそのときは思っていた。反対に、フォトニック結晶は「作り方を見付けて終わり」ではあり得ない。想像力次第でいろんな応用ができる。本腰を入れてこの技術をものにするには会社を作ることが必要だと決心した。研究成果の産業的ポテンシャルを引き出すには自分も一役演じたかった（図5は会社作りの仲間と社長）。有望と考えた応用^{(9), (10)}を名前だけ挙げておくと

- ・小形光導波路
- ・偏光計測
- ・光通信部品
- ・活性材料・スイッチ材料との組合せ
- ・光ディスクピックアップの部品
- ・特殊顕微鏡部品（共焦点、位相差、……）
- ・レーザ加工、光ピンセット
- ・深紫外偏光子、波長板

などである。

図5 東北大学から新しい会社へ筆者と行動を共にした佐藤尚現社長（左）、川嶋貴之副社長（右）両氏と、2011年の大震災直後の時期から会社経営を担いけん引した岸田勝人前社長（中央）

4.2 ハイテクスタートアップの楽しさと苦勞

大学発のものづくり系ハイテク会社の一つのケーススタディまでにその後の歩みを御紹介する。新技術を生かす会社を作るにはまず（利益が出るという意味での）技術の筋の良さが必要、更に資金・同志・設備や入居先が必要になる。東北大の研究室から若手が2人行動を共にし、電子機器の会社の経験者2人、合わせて5人で出発した。前後してベンチャーキャピタルから出資を頂いた。始めは大学と契約を結んで機械を借用し産学関係施設の中に机を置かせてもらうという形から出発した。

会社活動の最初はA社からの通信用レーザ組込みアイソレータに用いる偏光子の開発打診だった。ただし試作費なし、ワーカーはパートタイムで派遣を受けた。最初の大型受注はB社からのプロジェクト用高耐熱偏光子の委託開発・ライセンス供与である。C社からの液晶パネル用フィルムの複屈折計測装置の設計と製作受注もその頃であった。そのほか、上に八つ記した出口候補のほぼ全てにわたって顧客との技術検討を開始し、商談、試作または実売につながった。ただし、一時有望で販売額が上がったものでも産業界の盛衰が大変速いため今では出口製品が不振になったものもある。そういう変化の中で比較的安定した柱に育てたのが偏光応用計測器のシリーズと、セグメント化された偏光機能チップ（フォトニック結晶集積チップ）の諸応用との二つである⁽¹¹⁾。

複屈折の2D計測・画像化システムの心臓部はパターン化したフォトニック結晶チップをCCDイメージセンサのピクセルに1:1で貼り合わせた偏光画像センサで、それにより複屈折を画像化できる。（図4の中及び右、従来技術ではイメージセンサの前に置かれた偏光子を回転して時間をかけて得られる画像を新技術ではワンショットで取得する。）複屈折とは、透明物体を通り過ぎる光の感じる実効的な屈折率が、光の電界の振動面が縦方向か・横方向かに応じて値が異なる現象で、透明体内部の応力や構成材料の分子構造異方性の情報を与える。複屈折画像はいわば透明体内部を見るレントゲン写真である。計測の適用の一例としてスマートフォンのカバーガラスや、それに開けた孔の周りの応力複屈折の2D分布を示す（図6）。フォトニック結晶集積チップそのものの通信応用の一例は図7に示すようなアレー化半波長板である。デジタルコヒーレント通信用の偏光ダイバーシティとその小形化に利用が拡大している。

次に会社作りのバラ色の話でなく、どういう落と

図6 スマートフォンのカバーガラス内の複屈折分布を図3右のイメージで観察した結果 リターダンス（複屈折×厚さ）の最大値は約50nm。応力に起因する複屈折の大きさをカラーで表している。矢印は複屈折の速軸、ガラスの圧縮応力の方向を示す。

図7 セグメント化フォトニック結晶波長板の応用 デジタルコヒーレント通信の偏波ダイバーシティの高密度化などに利用できる。

し穴があるかハードウェア系の製造業の経験を書く。私たちの技術はフォトニック結晶部品の量産性を高めるところにポイントを置いているので市場はB to Bの製造業狙い、またはB to C狙いとなる。研究機関向けの販売は主要ではない。

ものを売ることは、カスタマの行動原理を認識することから始まる。大学で研究費を獲得しようとする普通は科研費が国のプロジェクトを申請することになる。あけすけに言うと、ファンディング機関は「お金を出さなければ組織が保たない」仕組みになっている。予算の枠内で審査点数の高い順に採択する。一方、製造業や消費者は「出すお金はゼロが一番良い」から180度違う。お客さんにどういう御利益があるか、費用を上回るかを常に考えなければならぬ。

技術が新しいほど製造業を軌道に乗せるのは楽ではない。製品の「かけがえのなさ」はハイテクスタートアップの生命線だが、買う方から言うと代替製品がないことはリスクである。つまり「経営が安定している会社の製品なら買おう」という客と、「買ってもらわないと経営ができない」という製造側との鶏・卵問題になる。

（タイプAの顧客）この製品はすばらしい。きっと会社は伸びるだろう。

（タイプBの顧客）この会社が製品を安定供給できると見極めがつくまで様子を見よう。

今の日本は気分が消極的だからタイプBの人や組織が多いが、我々の経験では少数ながらタイプAの人がいて、製品にほれ込んで数百万円～千数百万円の機器を買うよう上司を説得してくれる。部品販売について言えば、新規で珍奇な部品を、自社製品の心臓部に標準採用して下さるサポーターがいる。そういうケースがあちこちに現れてきている。立場を入れ替えて、私たちの会社でスパッタ装置やナノインプリント装置を選定し購入するとき、メーカーの大きさ、有名無名よりも製品の性能を規準に選んできたがそれで困ったことは一度もない。我々自身もタイプAでありたい。

日本のベンチャービジネス（VB）のもう一つのつらさは、失敗したときのダメージやリスクが大きいことだろう。日本の金融の仕組がアドベンチャーを萎縮させている、知的水準の高い人ほど二の足を踏んでしまう^{*4}。

とはいえ、日本には優れた技術的シーズはたくさんある。良いものを誠実に作って世の中に出していれば価値を認めてくれる人（happy few）が必ず現れる。大学発のものづくり系の技術を生かしたハイテク会社は日本にも複数社あるが、大学の活発な研究グループの数、大学の獲得している資金量とは比べられない。もっとたくさん生まれてほしい。仮に10の大学から、それぞれ10の先端技術VBが出て、各々10億の年商を上げれば産業のあちこち合わせてトータル1,000億の実証済みの新技術とトップ製品を日本は持つことになる。そのインパクトは大きいに違いない。

5. 19世紀と21世紀（まとめに代えて）

私は今まで、生得のものを生かせる職業に巡り合って、その中で競争の激しい時代や環境に合わない部分を陶冶するよう学習をし、うまくいったりいかなかったりしてきた。身近な人に時々言うのだが、なぜ私は光や電波のハードウェアの技術から離れないか、それははっきりしている。光や電磁波は不思議なくらい数式どおりに振る舞うことにいつも魅せられる。解析してみて、筋が良いな、実現したいなと思える構造には、それを実現する作製プロセスがきっと見付かる。榊裕之さん（半導体ナノ構造

^{*4} 中小企業が銀行融資を受けるとき、担保があっても日本では銀行が経営者の個人保証を要求するシステムになっている。金融機関の目利きの力の弱さをVBの経営者個人のリスクで補っているのがかなり元気な人でないとVBを始めにくい。最近政府はこの弊害を減らすべく力を入れている⁽¹²⁾。実効が上がるか注目したい。

を研究、東京大学名誉教授、現豊田工科大学長）と雑談して、「自然は、物質界は、デバイス設計や数理解析に好意的ですね」と意見一致したことがある。

光の分野で研究している限り、言葉を尽くして人を説得し論破する才能が仮になくても、

- ・新しいことを簡明な数式で示す
- ・シンプルな現物を作ってみせる

のどちらかができれば生きていくことができる。思うに私は役に立つ基礎知識を20代後半～30代前半頃までに実地の経験でゆっくり身に付けた。若い方に小声でアドバイスしてよければ、易しいことをいろんな角度から理解しておくこと、ゼロから理解しておくことには（例えば電磁波解析の数多い近似法を理解し経験しておくことには）一生にわたってリターンがあるでしょう、と言いたい。私の若い頃の主な仕事、2状態回路の理論やグレーデッドインデックスファイバの解析は、素人でないと気付にくい新しい問題があり、それを扱うだけの職業的な訓練がそれと知らずに既に身に付いていたという回り合わせによる。岡村先生流の学生指導では、学生は自分の運と力を頼りに試行錯誤する必要がある不安とストレスが伴うが、学生の力を120%引き出すには最適と思われる。もう一つ、自分のスタイルを常に意識すること、尊敬する先人、理想とする研究の範型を持つことも大切ではなかろうか。私の場合は高橋秀俊先生やHaus先生の仕事などがそれに当たる。

今までの歳月を四捨五入して言えば、自分にとって自然なことを常識的にやってきたつもりです。しかし本当のことは分からない。例えば、東北大学での研究生生活の終盤の頃、会議が終わった後に、同僚が二人にこにこしながら近づいて「昨日、岡村総吾先生に会ってきました。たまたま川上さんのうわさになったら岡村先生は“あの人は19世紀の科学者です”とおっしゃっていましたよ」と話してくれた。前から先生は「川上さんは私よりイギリス的だ」ともおっしゃっていた。英国好きな岡村先生が私のことを19世紀アマチュア科学者に近いと感じて下さったのかもしれない。同時に20世紀にミスマッチな変わり者という揶揄もあっただろう。

現在の私は経営を若い世代に引き受けてもらい、自分は好奇心を刺激され、会社の将来につなげたい課題に取り組んでいる。

- ・強集束光ビーム（電磁界理論における複素数座標の有用性）

・ストークス空間の光多値通信など、種々の偏波状態を空間的に高密度に共存させる方式・デバイス

・有機EL光の高効率取り出し

などである。絵描きは生きている間は絵を描き、作家は年をとっても小説を書くように、私も長く技術の仕事を続けたい。

自分の持って生まれた旧時代の気質や行動パターンを生存競争の厳しい21世紀の産業社会に適応、改造していく上で、西澤先生の厳しいリマーク（「アインシュタインに非ざる人は……」）は常に大きなチェックポイントだった。スタートアップ会社を立ち上げたこの10数年にもできるだけ自分の考え方を会社経営にアジャストするよう努めたが適応し切れないところも多かった。どうしても軍師がいる場面ではタイミング良く岸田勝人さん（図5の中央）をはじめとする達人たちが現れた。健康も今のところ大丈夫だし、運に恵まれついでに一生技術にじかに携わってみたいと願っている。

文献

- (1) 岡 潔, 春宵十話, 毎日新聞社, 東京, 1963.
- (2) 岡 潔, 紫の火花, 朝日新聞社, 東京, 1964.
- (3) 高瀬正仁, 岡 潔 数学の詩人, 岩波書店, 東京, 2008.
- (4) S. Kawakami, "Lossless reciprocal transformation and synthesis of a two-state network," IEEE Trans. Circuit Theory, vol. CT-13, no.2, pp.128-136, June 1966.
- (5) S. Kawakami and J. Nishizawa, "An optical waveguide with the optimum distribution of the refractive index with reference to waveform distortion," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-16, no.10, pp.814-818, Oct. 1968.
- (6) S. Kawakami and J. Nishizawa, "Kinetics of an optical wave packet in a lens-like medium," J. Appl. Phys, vol.38, no.12, pp.4807-4811, Nov. 1967.
- (7) 川上彰二郎, "畑と兎," 東北大学電通談話会記録, pp.578-596, Dec. 2000.
- (8) S. Kawakami, "Fabrication of submicrometer 3D periodic structures composed of Si/SiO₂," Electron. Lett, vol.33, no.14, pp.1260-1261, July 1997.
- (9) 川上彰二郎, "積層型フォトニック結晶の産業的諸応用," 応用物理, vol.77, no.5, pp.508-514, May 2008.
- (10) 川上彰二郎, "ある大学発ベンチャーの紹介と経験—偏光画像とフォトニック結晶のつながりについて—," 映情学誌, vol.63, no.11, pp.1544-1549, Nov. 2009.
- (11) <http://www.photonic-lattice.com/ja/products/>
- (12) <http://www.fsa.go.jp/news/25/ginkou/20140604-2.html>