



◆オーラルヒストリー\*

## フォトニクスの新領域を開いた 「面発光レーザー」

伊賀 健一\*\*

〈聞き手（インタビュアー）〉

荒川 泰彦 東京大学 教授

岸野 克己 上智大学 教授

波多野睦子（株）日立製作所 主管研究員・PJリーダ

〈担当編集委員〉

浅野 種正 九州大学 教授



### 1. 面発光レーザーの発想

**荒川**：先生の数あるご業績の中で、最も有名な研究は『面発光レーザー』ではないかと思います。既存の半導体レーザーの概念を超えた日本発の画期的な成果ですね。

**伊賀**：そのように評価していただくと、うれしいですね。最近では、高速 LAN の一つ、ギガビットイーサネットなど超高速データ通信用の光源をはじめ、コンピューター用マウス、レーザープリンターや、25 Gbps もの大容量データ伝送を可能にするスーパーコンピューターの配線用など、これからの大規模光通信網、光インターネット、光情報処理時代を開くデバイスとして期待されています。

また、並列フォトニクスという新しい科学技術領域を開拓する可能性も秘めていますので、21世紀の科学の進展、社会の発展に少しでも貢献できれば、発明者としてこの上ない喜びですね。

**荒川**：まさに、先生の先見の明がこのような可能性を開かれたものと思います。この研究を始められたのは、光ファイバー通信が黎明期を告げる時期と符合しているように理

い　が　けん　いち (工学博士)

1940 年 広島県生まれ  
1968 年 東京工業大学大学院理工学研究科  
電気工学専攻博士課程修了 工学博士  
1968 年 東京工業大学助手（精密工学研究所）  
1973 年 東京工業大学助教授  
1979 年 ベル研究所（アメリカ）客員研究員兼務（1980 年まで）  
1984 年 東京工業大学教授（精密工学研究所）  
1995 年 東京工業大学 精密工学研究所長  
2000 年 東京工業大学附属図書館長  
2001 年 東京工業大学名誉教授  
日本学術振興会理事  
2007 年 国立大学法人東京工業大学 学長（現職）

主な受賞歴

市村学術賞・功績賞（新技術開発財団）（1990）、William Streifer Award (IEEE/LEOS) (1992)、東レ科学賞（東レ科学財団）(1995)、朝日賞（朝日新聞文化財団）(1998)、John Tyndall Award (IEEE/LEOS, OSA) (1998)、東京都科学技術功労者（東京都）(2000)、The 3rd Millennium Medal (IEEE) (2000)、紫綬褒章(2001)、ランク賞（ランク財団）(2002)、Daniel E. Noble Award (IEEE) (2003)、藤原賞（藤原科学財団）(2003)、電気情報通信学会功績賞(2003)、応用物理学会業績賞・同 SSDM 賞(2006)、C & C 賞 (C & C 財団) (2007)、The Welker Award (ISCS) (2007)、NHK 放送文化賞(2009)

解していますが、その動機や時代背景からお伺いします。

**伊賀**：面発光レーザーのアイデアを思いついたのは 1977 年 3 月のことです。そのころは、ご指摘のように光ファイバー通信の黎明期にあたります。最初は多成分系ガラスの光ファイバーを使い、情報（データ）を半導体レーザーの光に乗せて送る方法の採用が考えられ始めました。ベル研究所の林巖雄さんたちによって半導体レーザーが初めて室温連続発振したのは 1970 年でした。GaAs 系半導体を材料に使っていたのです。私が助教授になったのは 1973 年で、このころから手作りの液相成長装置を使って半導体レーザー用 GaAs 薄膜の成長を始めました。ところが、1976 年ごろになって、シリカ系光ファイバーの伝送損失が波長 1  $\mu\text{m}$  よりも長い波長帯で大きくなるだろうと予想され始めました。

しかし、GaAs 系は発振波長が短いのでシリカ系ファイバーによる長距離通信には適さなかった。長波長帯で動作するレーザーとして期待されたのが GaInAsP 系で、この

\*インタビュー実施日：2009年2月16日

\*\*国立大学法人東京工業大学 学長

材料の研究に転じたのです。1977年以後、私たちを含むいくつかの研究グループで、 $1.3\mu\text{m}$  帯で室温動作するデータが出始めるようになりました。

**荒川**：長波長帯の光通信に適した半導体レーザーを作りたいというのが目標だったのですね。

**伊賀**：そうです。でも、長波長帯レーザー開発の前に、半導体レーザーそのものにも課題があると思っていました。

私が東工大で卒業研究に入ったのが1962年。後に学長になる未松安晴助教授（当時）の研究室で固体レーザー研究に着手し、その後、半導体レーザー研究へと向かいます。半導体レーザーは、当時から現在に至るまで、ウエハー（結晶）をへき開（結晶を割ってへき開面を出すこと）して作った端面発光レーザーが主流です。ウエハー表面に平行方向に発光層と電流注入層を薄膜状に結晶成長させウエハーを割ってできた、へき開面を反射面としてそこからウエハー表面と平行な方向、つまりウエハー表面から見れば横方向に光が出てきます。私も実際に手術用のメスでウエハーを割ったものです。今は自動化はされていますが、当時は1個1個手作りで、大量生産が難しいと感じました。しかも、单一波長が得られないなど課題を抱えていました。

## 2. 開発へ三つの条件を設定

**荒川**：それを解消するために先生が取り組まれたことは何でしょうか。

**伊賀**：半導体レーザーに必要な条件を設定したことです。①单一波長、②その波長を設定できる、③大量生産—この三つの条件を満たすレーザーができないかと考えたのです。その目的のために試みたのがDFB（分布帰還型）レーザーとエッチングレーザー。DFBレーザーは後にお世話になるベル研究所 Herwig Kogelnik さんの発明で、回折格子を使うので单一波長に波長制御ができるが、レーザーの個別化にはへき開を必要とします。へき開を必要としないエッチングレーザーでは短共振器にすれば单一モードにできるが、波長の設定ができないなど、そこそこにモノはできるのですが、一長一短があって……。

**荒川**：「どうもしつくりこない」と呻吟しんぎんされている様子が浮かぶようです。

**伊賀**：三つの条件を満足する新しい半導体レーザーが欲しい、その一心から考えをめぐらせていましたとき、アイデアの光がピカッとはじけました。まさにひらめきでしたね。横から光を出すのではなく、垂直方向に出すようにしたら、という発想でした。半導体ウエハー表面に垂直方向に発光層と反射層を積層し、ウエハー表面の垂直方向に光を出すレーザーにしたらいいのではないか。ちょうど、日光の鳴き龍のような形で、上下で共振するレーザーにすると、大量生産はできなくはない。单一モードになる可能性があるし、波長の設定も何とかなりそう。つまり、三つの条件を満たすレーザーになるのではないかという強い手応えを感じました。

**荒川**：面発光レーザーの発想の出発点が、单一モード化にあったというのは大変興味深いことですね。

**伊賀**：光通信に使うことをターゲットにしたので、單一

モードにできるかを第一に考えました。この点の先鞭せんべんをつけたのは末松教授で、本誌のオーラルヒストリーにも登場していますね。

**荒川**：先生がレーザー研究に取り組まれてから15年目で、面発光レーザーという新しい芽を見いだされたのですね。そのアイデアに基づいて、一挙にレーザーの製作に取り組まれたのですか。

**伊賀**：まずLEDで構造を作り、その成果をアイデアとともに新レーザーを発想してちょうど1年後の1978年3月の応用物理学会の講演会で初めて発表しました。そして、翌1979年に大きなヤマ場を迎えます。GaInAsP系の材料を使い、上下に金属の反射鏡を付け、液体窒素で冷やしながらパルスでドライブしたところ、ある電流値でピカッと光るじゃありませんか。スペクトルを見ると、LEDと比べて格段に細い。これはレーザー発振に違いないと確信しました。電流注入でレーザー発振ができた、このときの興奮が今でもよみがえってきますね。

## 3. 冷ややかだった周りの反応

**岸野**：学会報告も相次いだと思いますが、研究者の反応はいかがでしたか。

**伊賀**：1978年の応用物理学会の発表に次いで、1979年秋にボストンで開かれた量子エレクトロニクス国際会議こうりくいぎで発表し、最初の論文をJJAPに投稿しました。筆頭著者は雙田晴久君（現在、ファイベスト社）でした。

学界での反応ですが、しきい値電流が800mAと非常に高く、すぐ壊れてしまうことが多かったために、おもしろいアイデアだが、実用にはならないんだろうという見方が大半でした。大きな問題は、レーザー発振のための光利得が足りなかったこと。

私としても、原理をきちんと押さえ切れていないからなのか、技術が未熟なためなのか、100%自信があったわけではなかった。そこで、研究室では面発光レーザー、DFBレーザー、エッチングレーザーの3グループに分けて並行研究を行う作戦に出ました。

**岸野**：先生は、面発光レーザーの初期の成果をあげられたころ、ベル研究所に留学されますね。ベル研で面発光レーザーの研究もされたのですか。

**伊賀**：ベル研には1979年4月から1年半、文部省の在外研究員として留学します。ここで電流注入による面発光レーザーの研究をやろうとも考えました。ところが、当時のベル研には、誘電体薄膜形成装置など研究に必要な装置がほとんどなく、GaInAsP系の結晶成長を日本に学べ、追いつけという時代でした。当時MITのJim Hsiehのところを除いては、長波長半導体レーザー研究は日本のはうがむしろ先行していたのです。

**岸野**：では、具体的には何を……。

**伊賀**：ほぼ1年間、朝から晩まで結晶をエッチング加工してモノリシックレーザーを作る研究に没頭しました。結晶成長のエキスパートのBarry Millerさんと組み、彼が持ってきた結晶を加工してレーザーの特性を確認する毎日でした。彼は後にMOCVDでベル研の半導体レーザー用ウエ



左から、波多野、荒川、岸野の各氏

ハ一成長を支えた人物です。また、エッティング、成膜、測定といった半導体レーザーに関する多くのことを教えてくれた Ray Martin さんという技術者の存在も大きく、ベル研で積み重ねた経験が 1980 年秋に帰国して再開した面発光レーザーの研究に大きく役に立ちましたね。

#### 4. エッティング技術が突破口

**荒川**：それはどのような点ですか。

**伊賀**：帰国した当初は、先の 3 種類のレーザー研究を推進しましたが、極短共振器の面発光レーザーを作ったときのことです。InP の基板上に GaInAsP (4 元) からなる薄膜を成長させ、その上にレーザー用のエピタキシャル層を形成した。基板を研磨したあと、InP 基板を塩酸でエッティングすると 4 元層が現れ、エッティングは 4 元層で止まるのです。この 4 元層だけをエッティングできる溶液で除去すると、厚さ 5  $\mu\text{m}$  ほどのレーザー用のエピタキシャル層だけが残ります。この両面に誘電体の多層膜による反射鏡をつけ、周囲に電極を形成した結果、性能の優れた面発光レーザーができたのです。

**荒川**：今のお話から、面発光レーザーの実現のポイントになったのはエッティング技術のようですね。

**伊賀**：そのとおりで、雙田君らは「そんな薄い膜のところにエッティングはできませんよ」とずいぶん反対したものでした。しかし、エッティングに関して、研究室では上林利生君（現在長岡技術科学大教授）らが考え出したエッティング技術やベル研での 1 年余の研究実績がありました。エッティングを行い、誘電体の多層膜をつけると反射率が向上し、液体窒素温度でしたが、スペクトルがきれいで数十 mA という低いしきい値電流で発振する面発光レーザーができたのですから驚きでした。しきい値電流も当初より 1 けた小さくなり、縦、横方向とも单一モード発振で、反射率を上げる工夫と電流をうまく閉じ込める工夫をすれば、もっと優れた面発光レーザーができると確信しました。1982 年ごろのこと、この研究がターニングポイントとなりました。応物学会主催の固体素子材料国際会議 (SSDM) で発表し、20 年以上後の 2006 年に SSDM 賞をいただきました。研究

室では、面発光レーザー 1 本に的を絞り、本格研究に乗り出ことになったのです。

**荒川**：オリジナルは自分のところにありながら、在外研究留学時の経験が大きくモノをいう結果になったのですね。

**岸野**：面発光レーザーは、構造をとてもよく表したネーミングだと思います。命名されたのは。

**伊賀**：末松教授にゴッドファーザーとなつてもらつて（笑い）。英語名は「Surface Emitting Laser」。のちに、米国では、垂直共振器面発光レーザー：VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) と呼ばれるようになりました。

**岸野**：面発光レーザーは、長波長通信用素材としては使えないダメを押された GaAs 系でも作られましたね。

**伊賀**：そうです。よく知られているように、1980 年代の初めにコンパクトディスク (CD) が登場し、CD 用として AlGaAs 系の波長 780 nm のレーザーが採用されました。私たちも GaAs 系の面発光レーザーを平行して始めました。一つのきっかけは、後に応物学会長になった田幸敏治教授が退官し、今質問なさった岸野さんが上智大学へ助教授で昇任、推進したのは私が指導を受け継いだ博士課程の木下進君（現在、（株）富士通研究所）でした。液相成長装置も岸野さんたちが作ったものです。この装置によって小さなレーザー領域を結晶に埋め込んで、埋め込み型の面発光レーザーにする試みを行いました。電流の閉じ込めがうまくいき、パルス動作ながらしきい値電流が驚くほど低い 6 mA でのレーザー発振に成功しました。

1986 年秋のこと、金沢で開かれた半導体レーザー国際会議のポストデッドライン論文で発表しました。ほとんどの人がモノにならないと予想していた面発光レーザーの存在感を、参加者に大きく印象づけることにもなり、これはすごいということで、何人かの研究者が研究を開始する契機ともなったようです。

#### 5. 室温連続動作に初めて成功

**荒川**：レーザーが本格的に発展するためには、室温連続動作も大きなカギを握っていますが、面発光レーザーについ

ても同じですね。

**伊賀**：室温連続動作が実用化の不可欠な条件であるのはいうまでもありません。その扱い手として末松教授が私の研究室に送り込んだのが小山三三夫君（現在、東工大教授）。彼は理論的な洞察力と実験の腕をもつホープで、そのことは、研究のいくつもの場面で明らかになっていきます。

例えば、通常のストライプ型半導体レーザーを作ってしきい値電流密度を測定し、面発光レーザーにしたらどのくらいの反射率が必要かを見積もるという、きわめて論理的な手法を用いました。これは1987年の精密工学研究所の所内報英文論文として発表していないのですが、とても優れた論文です。

その少し前から、薄膜の成長面が平らにでき、その厚さが制御できるMOCVD装置の準備を始めました。東工大におけるMOCVDの草分けは格元宏さん（当時東工大教授、凸版印刷（株）副社長を経て、東工大名誉教授）で、助言を得ながら私たちの手作り装置も1986年に完成します。小山君はこれを使って活性層の膜厚がおよそ2μmのダブルヘテロ構造を作り、基板のGaAsを除去して誘電体多層膜を両面に形成する構造で面発光レーザーのしきい値電流を下げた。そして、1988年8月、ついに室温連続動作に成功します。しきい値電流は当時のCDレーザー(50mA)の半分以下、20mA程度でした。

**荒川**：理論的な洞察力と新しい結晶成長技術の相乗効果と言ってもいいでしょうか。

**伊賀**：誰よりも喜んでくれたのは末松教授で、電子情報通信学会の編集幹事として英文誌の発刊を手がけていました。海外の論文誌と伍していくために論文掲載を早め、投稿後1カ月で掲載しようと計画していたのです。そこで、室温連続動作の初期の成果の投稿を勧められ、約40日後（1988年12月号）に載りました。

それはよかったのですが、この論文の引用はまったくなかった。しかし、補足データをつけてApplied Physics Lettersの1989年7月号に掲載した論文は、数百以上の引用がありました。

**荒川**：日本の論文誌が抱えるローカル性という問題でしょうね。

**伊賀**：現在、Nature, Scienceなどの商業雑誌に載る論文がもてはやされて、学会による学術論文誌の存在が危うくなっていますね。特に、日本語で書かれた理工系の膨大な論文は、世界的に読まれるケースが少ないと思います。もちろん優れた論文は翻訳されていますが、引用の対象になかなかならない。それが研究成果そのものに影響を与え、低い評価につながるようでは大問題です。しかし、早く出版された電子情報通信学会の論文が私たちのオリジナリティーを決める防衛論文として生きています。ともかく早く出版すること、これが日本の学会誌にとって重要です。

## 6. 二つの成果が研究フィーバーのきっかけ

**荒川**：それは私たちも危惧している点です。

一方で、面発光レーザーの研究は大きく世界的に広がりましたが、それを促すエポックとなった出来事は何でしょ

うか。

**伊賀**：1988年に私たちが達成した室温連続動作の成果と、翌年、ベル研のJack Jewellさんらが発表した、しきい値電流2mAの成果でした。この二つが開発競争に火をつけましたね。

**岸野**：彼は先生の研究室を訪れたとか。

**伊賀**：1988年7月のことです。彼はベル研が進めていた光コンピューターグループの一員で、面発光レーザーを光コンピューター用の並列光源として狙っていたようです。その研究の途中に私たちのところに来たのですが、翌年、彼らも室温連続動作に成功します。Jewellの着眼点は利得が高く取れるInGaAsを使い、量子井戸構造で面発光レーザーを構成し、しきい値電流を大幅に減らしたこと。私たちも量子井戸で挑戦していて1986年にはいたのですが、好結果として先を越される苦さを味わいました。この二つの室温連続動作の成果に触発されて、世界的に面発光レーザーフィーバーのような状況になります。ベルリンの壁が壊れた1989年以降のことです。

**岸野**：正に、様変わりになったのですね。

**伊賀**：世界的な情勢が変化した1990年代に入って、米国ではNSFやDARPAが研究支援を開始し、ベル研から分離したベルコアやUCサンタ・バーバラ、MIT、イリノイ大学など多くの大学、研究機関が競って研究プロポーザルをまとめ、複数の大学がチームを作って「ワシントン詣で」が盛んに行われました。3チームが採択され、中でも最強だったのがUCサンタ・バーバラのチームでした。また、ヨーロッパでも、ECによる大規模な研究プロジェクトが始まり、ドイツのウルム大学やミュンヘン工科大学などが先導しました。

**岸野**：有力な大学、研究機関がこぞって参加したようですね。では当初、目的とされた長波長帯の面発光レーザーの開発動向については。

**伊賀**：私たちは1.3μm波長の面発光レーザーの室温連続動作に挑戦するため、馬場俊彦君（現在、横浜国大教授）らメンバーを補強し、1993年に世界で初めて1.3μm帯の室温連続動作に成功しました。

**岸野**：当時の学会では、しきい値電流が下がった、反射率が上がったといった、先駆け競争が展開されたようでしたが。

**伊賀**：1.3μm帯に限らずにいいますと、1992年から1995年ごろはしきい値電流値の競争でした。特に、GaAs基板上にInGaAs/GaAsの量子井戸を用いる系が中心で、どこかが0.5mA達成のデータを打ち出すと、別の大学がそれをしのぐ成果を出すといった具合でしたね。私たちも一時期、世界記録(70μA)をもっていましたが、その後、50μAのデータが出て、その座を奪われました。そのしきい値電流ですが、活性層の体積に比例するというスケーリング則があり、体積を小さくすると、しきい値電流は下がります。しきい値電流のチャンピオンデータはμAオーダーまでいったのですが、小さくすると熱が出てパワーが取れないことがわかり、しきい値電流を下げる競争はいったん打ち止めにしようということになりました。

**岸野**：スケーリング則について、先生はよく議論されていましたが、しきい値電流競争にストップをかけられたのは、実用化をにらんだ措置だったのですか。

**伊賀**：ストップさせたわけではないのですが……。1990年代中ごろからインターネットの利用が爆発的に増えて、高速 LAN の一つであるギガビットイーサネットが使われるようになります。これは近距離の LAN なので、CD 用レーザーを使う動きが米国で盛んに検討されました。ただ、当時の CD 用をこのようない通信用途に使うには信頼性が十分でなく、厳しい通信系のスクリーニングによって寿命を確保しようとするとコストが高くなってしまう。そこで、生産性の面で優れた特性を発揮する面発光レーザーが使われるようになり、これを機に 1999 年ごろから大量生産が始まりました。

特に、面発光レーザーは、一般の半導体レーザーのボトルネックを突破できる可能性があります。横方向の大きさが数  $\mu\text{m}$  と小さく、二次元的にたくさん集積(アレイ化)できるので、レーザー特性の検査が簡単で大量生産に向いています。また、しきい値電流が小さいことからシステム全体の消費電力が小さい、温度変化に対して特性が変化する幅が少ない、ほかの電子デバイスとの集積化も可能といった特徴があります。

## 7. フォトニクスという新科学領域の発掘へ

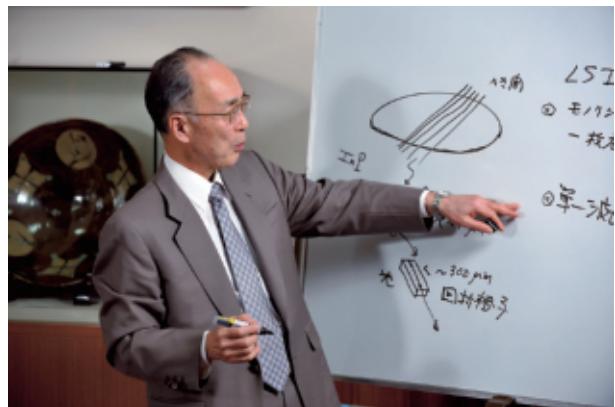
**荒川**：このような特徴をもつ面発光レーザーが今後、どのように発展していくか、展望していただくと。

**伊賀**：すでに、波長  $0.85\text{ }\mu\text{m}$  の面発光レーザーはギガビットイーサネットに大量に使われていますし、2011 年には面発光レーザーを組み込んだモジュールなどで 1 兆円を超える産業規模になるだろうとみられています。 $1.3\text{--}1.55\text{ }\mu\text{m}$  の長波長帯の実用化も目前ですね。赤外から青色を出す材料を用いた面発光レーザーも実験的には成功しているほか、RGB の 3 原色の面発光レーザーアレイがあれば、新しい照明や表示が可能です。レーザープリンターへの応用も面白い。

**荒川**：また、LSI 間や装置間を光技術でつないで、超高速でデータを送るのに、面発光レーザーが期待されていますね。

**伊賀**：次世代の計算科学、計算機科学を開く主役として、ペタフロップス(毎秒 1000 兆回の浮動小数点演算ができる計算能力)級の次世代スーパーコンピューターが注目されています。このスパコンに向けて、NEC 社や私の後継者でもある小林功郎さんたちは LSI の 1 個当たり毎秒 20 Tbps (テラビット) もの大容量のデータを伝送できる光インターフェクト技術についてもめどをつけています。ただ、2009 年になって、NEC はこのスパコン計画から撤退したのは残念です。

しかしこの技術は、面発光レーザーで LSI 間などを結び、世界最速の毎秒 25 Gbps で世界最長 100 m のデータ伝送を実現したり、1 個の LSI の周囲に 1000 信号分の光モジュールを高密度に実装することができます。これらの技術を数年先の最先端 LSI に適用すると、わずか 10 cm 角以内のプリント基板上で 20 Tbps もの大容量の信号の入出



伊賀氏

力を行うことが可能で、業界標準の光モジュールと比較すると、およそ 1000 倍にもなりますので、将来いずれ役に立つでしょうね。

つまり、光通信、コンピューターオプティクス、光センシング、ディスプレイ、携帯電話、自動車内データ伝送など幅広い応用が待っていて、こうした応用分野が進めば、新たに 1 兆円規模の産業が創出されるといわれています。

**荒川**：面発光レーザーがもたらす効果の大きさがわかります。加えて、冒頭に触れたフォトニクス分野があります。

**伊賀**：面発光レーザーの光は、横方向には閉じ込められてないということから、これを三次元にしようという動きがあって、これがフォトニクスという分野へ広がっていきました。屈折率が周期的に変化するナノ構造体を操ることで、結晶中の光の伝わり方をナノ構造で制御できる特徴があります。すでに、DFB レーザーの反射構造としても応用されていますが、二次元、三次元に光を閉じ込められるようになると、フォトニクス結晶ファイバーやフォトニクス結晶デバイスなど、まったく新しい科学領域が開かれるでしょう。先に紹介した馬場さん、京都大学の野田進さん、今質問いただいた荒川さんなど面発光レーザーの研究者がフォトニクス研究へと向かっていますので、これからが楽しみですね。

**岸野**：先生の研究室は「Open 24 Hours のセブン・イレブン」と呼ばれていたように記憶しています。

**伊賀**：ありましたね。面発光レーザーは、1986 年に文部省の特別推進研究に採用され、1996 年にスタートした COE プログラムの第一期プロジェクトに採用されました。この年の COE プロジェクトには、のちにノーベル賞を受賞された野依良治さんをはじめ、佐藤勝彦さんらそうそうたるチームが顔をそろえました。2001 年までの 6 年間、計 16 億円の支援を受けました。ターゲットが決まった研究への予算集中は大きな効果があり、世界と伍して競争することができました。ちょうど、そのころです、研究室がそのように呼ばれたのは、研究室には多くの元気な学生が集まり、在任中は博士課程 40 人、100 人を超える修士課程、学部学生が研究室から育ち、各界で活躍しています。

## 8. コントラバスとレーザー

**波多野**：話題を少し変えてお聞きします。先生はコントラバスを弾かれ、楽器が音を奏でる原理を論文としてまとめられたと伺っています。

**伊賀**：論文というほどのものではないのですが、コントラバスは弦楽器の中でも最大の大きさと最低の音域を受けています。コントラバスを弾くことはもちろんですが、これを通して弓弾き弦楽器にも共通する弦の振動、ヘルムホルツ波、楽器の鳴り、よい音のための奏法についても研究しました。それを日本学術振興会の資料として Duo 21 を組んでいる波多腰玄一さん（東芝）といっしょにまとめています。

**波多野**：コントラバスとの出会いは。

**伊賀**：東工大の学生のとき。虜になりましたね。もちろん、アマチュアの奏者として。現在の師匠はフランクフルト市立歌劇場管弦楽団首席奏者の野田一郎さんです。コントラバスを美しく弾くために、奏法についていっしょに研究しようと思ったのです。

コントラバスの弦の長さは約 104 cm あり、弦を弓で擦りながら弾くので、倍音がいっぱい発生します。そのとき、弦は滑らかな形ではなく、三角形にとんがり、それが縦方向に往復していることを理論的、実験的に発見した。発見したのは私ではなく、ヘルムホルツという物理学者。その動きを見ると、三角形が往復する 1 周期が元の音の基本振動の周期と同じなんです。そこで、私は仮説を立てた。「ヘルムホルツ波をいかにうまくドライブするかが、いい音を出す、うまく弾くコツではないか」。上手な演奏者はそのコツを感覚的に理解しているが、それを理論的に解明して、アマチュア演奏者でもいい音を出せるようにしたいというのが目的です。

**波多野**：そうなると、初心者の方にも強い味方になりますね。では、そのコツを。

**伊賀**：上手に弾くためのガイドラインの一つと考えてほしいものです。まず、弓で弾く弦楽器では、一方向に弓を動かしても（直流駆動）、振動（交流）が生じます。それはヘルムホルツ波の存在によるものです。すなわち、同じ速度で一方向に弓を弾いていても、摩擦と滑りによってヘルムホルツ波が駆動される。弓の根元から始まって手前の方向に引っ張るように弾くダウンのときには、コントラバスの正面から見て左回りに、逆に弓先方向に弾くアップの弓のときには右回りのヘルムホルツ波が起きる。ダウンとアップが交互にくる場合、ヘルムホルツ波は左回りから右回りに急転回しなければならない。そこをうまく弾くと楽器は美しく鳴るのです。直流の電池による駆動で、交流である光が出るレーザーと同じです。

野田さんのコントラバスの奏法『野田メトーデ』によると、「弓を弦と約 15 度の角度をつけて弾き始めなさい」と教えている。弦楽器の上手な人は直角に当てて弾いているのではないのです。このことから、ダウンの場合、左回りのヘルムホルツ波を誘起する気持で 15 度の角度をつけて弾き始めると、音の弾き始めに“ギャッ”といういやな雑

音を発することなく、しっかりとした音で音の立ち上がりを弾きだすことができるようになります。

## 9. 光も音も美しくないと…

**波多野**：先生の仮説どおりに弾くと、熟練奏者と同じような音を出せるというわけですね。

**伊賀**：レーザーでモードロックパルスというのがあるでしょう。レーザーの研究者ならよくご存知です。普通の半導体レーザーが連続的に発振しているとき、そのスペクトルを分離すると、波長がいっぱいある。鏡の端に変調器をつけて各モードの位相同期をすると、この多くの連続波の波長がロックされて時間的にはパルスになるのです。これが行ったり来たりするのを使ったのがフェムト秒レーザーなどですね。何もしないと多くの波長がそれぞれ連続的だが、位相を合わせるとロックされてパルスになっている。先ほどのヘルムホルツ波はモードロック、つまり孤立波で、モードロックレーザーと同じであるのがわかつてきました。

**波多野**：このあたりは、レーザーと楽器の両方を知っている人でないと理解できないところでしょうが、なかなか興味あるお話ですね。どちらが研究の本務か、わからないくらいです。

**伊賀**：こういうことがわかると、面白いじゃないですか。人間の耳は不思議なもので、倍音を重ねて聴くと、いかにも基本波が聴こえているように感じるそうです。コントラバスだけで低い音を弾くと、ともすると、聴こえにくいことがあります、同じ楽譜をチェロとともに弾くと、圧倒するような迫力が生じることも多いです。チェロのほうが 1 オクターブ高い倍音が出ているから。ベートーベンなどが作曲した交響曲でこの手法が多く使われているのは、そのためではないかと思っています。

**波多野**：音楽愛好家にとっても参考になるお話だし、学生にとっても、とてもよい刺激を受ける科学教材といった感じですね。

**伊賀**：レーザーは活性層の上下に反射鏡があり、光が鏡に反射して放出されます。楽器も前と後ろに板があって共鳴して出てくる。共通の物理現象をもっているんですね。光技術はこれからの社会に欠かせない技術だし、音楽は人に安らぎを提供するものです。これらは完成したものに見えますが、まだまだ不十分なんです。感性を起点に研究しなければならないことが山積み。光も音も美しくないと—これが私の結論であり、願望ですね。

## 10. 音楽がレーザー研究に道筋つける

**波多野**：また話題を変えさせていただいて、先生が研究者を志すことになった子ども時代のお話をお聞きします。

**伊賀**：昭和 15 年 6 月、広島県呉市で生まれました。ちなみに、その日は弘法大師の誕生日もあるんです。曾祖父は、呉に近い倉橋島で採れる桜御影という名石を国会議事堂に納めていた。家代々の墓も国会議事堂と同じ桜御影を使っています。晴れた日の国会議事堂は赤く映えてきれいですよ。

祖父はエンジニアになりたかったらしく、ラジオの部品

が藏にいっぱいありました。私は祖父が集めた部品を使って手作りの鉱石ラジオを楽しみましたね。保存しておけばよかったと思うほどの出来栄えでした。鉱石ラジオもそうですが、山や畑があって、自然に触れる環境があったからでしょう、理工系に進むことは早くから自覚していて、大学は迷いもなく東工大を目指しました。

**波多野**：東工大に入学されて、最初に触れられたことは。

**伊賀**：音楽ですね。ちゃんとした音楽教育を受けたわけではなかったけれど、好きでしたね。歌舞伎町あたりでジャズやハワイアン、タンゴなどを聴きまくりました。大学ではサッカー部に入りましたが、目があまりよくないと理由でサッカー部を辞しました。いまでもOB会に入れてもらっています。サッカー部の主将が引馬基彦さんというバイオリンで東工大管弦楽団のコンサートマスター。彼に頼んで、オーケストラ部に入れてもらい、ここからコントラバスとの深い付き合いが始まります。学部のころは勉強もしましたが、練習三昧。そのツケがまもなくやってきます。

4年生になるとき、研究室を選ぶことになるのですが、周りは成績のよい学生ばかり。彼らと戦っていくには違ったことをやるほかないと思い、専攻分野を探したところ、末松助教授が研究室を作ったばかりで、レーザー研究を始めるという。レーザーだ、光通信だといっても、当時は誰もわからない時代でした。池上徹彦（現在、文部科学省宇宙開発委員会委員）、平松俊昭（元NEC）の両君と一緒に研究室の住人となり、池上君は半導体で光を出す研究、平松君はエサキダイオードを使ったマイクロ波の増幅器、私は固体のルビーでレーザー研究を始めました。3人はその後も、光研究を継続して行うことになります。

**岸野**：ここから面発光レーザー研究へとつながっていくんですね。マイクロレンズアレイの研究も柱の一つとして進められましたね。面発光レーザーとの関係も含めてお話ください。

**伊賀**：1979年に拡散法を用いる平板マイクロレンズを考案しました。屈折率分布をもつアレイ状の小さなレンズで、レンズを一括して製作するという点では面発光レーザーと共通のコンセプトをもっています。屈折率分布の測定には、國分泰雄君（現在、横浜国大副学長）の方法が寄与しました。日本板硝子（株）との共同研究によって大量生産までいたほか、後に高輝度プロジェクターの実用化にも役立ちました。本学会の下部組織である微小光学研究グループの代表を仰せつかっていますが、その活動のもとはこの辺にあります。

## 11. 実験の手違いや失敗の中身を吟味する

**荒川**：先生は、大学を出て企業に就職することは考えられなかったのですか。

**伊賀**：もともとは会社志向でした。学者になろうなんて高邁なことは思っていなかった。でも、オーケストラ、コントラバス、そして、レーザーが学者への道に引きずり込んだ。（笑い）

**荒川**：一般に研究に失敗は付きものですが、失敗して悔し

い思いをされたことは。

**伊賀**：大ありますよ。例を一つ上げましょう。「ルビーレーザーにおける単一モード発振」の研究を修士のとき行っていた1964年ごろのことです。ルビーレーザーのしきい値を下げるため、レーザー結晶の内側から見た端面を凹面にして共焦点共振器にするつもりで研磨を発注したのです。ところが、出来上がってきたのは何かの間違いで凸面鏡でした。せっかく作ったのだからと動作実験をしたところ発振したのです。それもきれいな横モードで、周期的にそろった緩和振動発振でした。残念なことに観察できたのはただの1回でレーザーは壊れてしまいました。理論的にモード解析を行って学会で発表はしたのですが結果が貧弱でそのままにしておきました。利得の効果を入れていなかったこと、そのころの大型計算機のメモリー容量がわずか数キロバイトでしたからちゃんと計算もできなかったのでした。その後スタンフォード大学のA. E. Siegmanさんらが1974年ごろ「不安定共振器」として発表し、高出力固体レーザーに応用して一般化したので、もう少し頑張っていたら悔しい思いをしました。

**波多野**：こうした経験を踏まえて、若手の研究者にメッセージを。モチベーションをどのように高めていったらいののかなどについて。

**伊賀**：これがなかなか難しいところで、正解はありません。科学は基本が大事ですから、基礎教育が重要なのはいうまでもありません。単に応用を見ていくだけではダメですね。技術レベルは年々高くなる一方ですから、それに対応するには、基礎で得た知識を基に実験で確かめる、こういう発想が不可欠です。実験の手違いや失敗によって、思いもかけない結果が出てくることがあります。それを科学にするとか、見過ごしてしまうか、そこが大きな分かれ道ですね。加えて、いつも新しい技術が現在の技術を否定して取って代わる。これは本質であって、抗することができないものです。しかし、元のコンセプトを提示し、推進した源流を忘れないでほしい。

**波多野**：最後に、応用物理学会への期待をお願いします。

**伊賀**：研究者にとって、初めて取り組んだ研究が世の中に知られることほど、うれしいことはないですね。そのきっかけが学会発表や学会誌だと思います。私の面発光レーザーに関する多くのアイデアも講演会で発表でき、JJAP誌にも掲載され、研究の端緒を支えていただいたことに感謝しています。いつまでも研究者の熱い思いを伝え、育てていってくれる学会であってほしいです。日本の学会の役目は、芽を育てる、多少の間違いは恐れず早く出版すること（責任は著者にあり）、そして研究のオリジナリティーを保護すること、微小光学研究グループが一つの例ですが若い人が切磋琢磨する機会を作ること、などでしょうね。

**荒川**：学会への注文もいただき、大変貴重なご意見を伺えたインタビューでした。長時間、ほんとうにありがとうございました。