

半世紀の研究遍歴 ―応用物理を世に役立てる―[photo 1]

林 巖雄

先端技術の研究者の一人として、新世紀の初めに京都賞をいただき、大変に嬉しく、かつ光栄に思います。

私の両親のことから振り返ります。父は愛知県瀬戸で代々神職をしていた家に生まれましたが、8歳の時、林家に養子に來たと聞いています。林家は代々、江戸で医者をしてきたようで、私の生まれた麻布の家は開業医風な建物でした。母方の祖父は新潟の農家土田家に生まれ、上京して実業家となり、私の母はその二女として麹町で生まれました。父は東京帝国大学医学部に学び、基礎医学(薬理学)を専攻し、当時医学の進んでいたドイツに2年間の留学をしていました。父の学んだ大学は現在もストラスブールの町に存在しています。

父は先妻に死別され、母も夫に先立たれた後の結婚でしたので若くない両親でしたが、それだけに寵愛を受けて育った面もありました。

私は1922年、四男として生を受けました。麻布の生家は関東大震災にも焼失を免れましたが、6歳の時、当時新開地であった田園調布に移り、長い間この地に暮らすこととなります。麻布の家の記憶は多くありませんが、父に連れられてすぐ近くにあった東京天文台の跡地に行き、器械の土台になっていた大きな石の上に残っていた水銀で遊んでいました。あのプルプルとした感触を楽しんだことを今もはっきり憶えています。面白くて遊んでいてもこれは毒だからと止められた記憶はありません。

幼い頃から理科的なものが好きでしたが、植物を採集したり、虫を捕ったりというのではなく、私の場合は少々異なっていたように思います。「理科」というより「理工学」という言葉を使っておきましょう。父は基礎医学の科学者(Scientist)であり、私は科学と工学(Science と Engineering)をかけた好みを持っていたらしいのです。夏の湯上がりに2階のテラスから空を見上げて、あれが木星、これが火星と父から教わったことは、今も心に生きていますが、この時の話は太陽の周りを回る惑星であり、星座をつくる恒星については聞いたことはありません。惑星には、金星、木星、火星からだんだん遠くなって天王星、海王星というものがあって、一番遠いと思った海王星の動き方がどうも異常であるから、調べてみたら遠くにもう一つの惑星(冥王星)があることがわかった、という話も覚えています。

身体を鍛えるためにと、小学校に上がる頃から、父と一緒に冷水浴を試みるようになりました。洗面器一杯の冷水を肩から浴びるのは真冬には勇気がいります。この習慣は成人していつの頃からか止めてしまいましたが、いまだに起床時に寝巻を脱いで体操をしないと気持ちが悪いのは、そのつながりでしょう。

1930年、学習院初等科に入学、小学から高等学校まで14年間の通学でしたが、この学校の教育方針については、父の好むところであったように思います。在学中、印象に残っているのは、勤労奉仕活動として広い校庭の草むしりなどに汗を流したこと、そして中学と高校1年の時の学生寮の生活、夏期の沼津遊泳場での生活でした。数週間にわたる遊泳訓練の期間は、わりあい厳しいトレーニングが続きました。特に「遠泳」という数 km の長距離をがんばって泳ぎ切った体験は、今日でもあざやかに蘇ってきます。学生時代の数々の体験は貴重なものとして今に生きています。

自分の長い研究生生活を通じて、「自己の利益を優先にしない」という基調を学習院在学中に学んだように思います。自分の研究成果を立身出世や金銭的利益のために役立てようとあまり考えないことです。

話は前後しますが、中学生の頃からでしょうか、物理の法則が自分の心の中で作用する一心の中にある物の像が物理の法則に従って動作するようになりたいという願望が生まれました。

具体的には、平坦な氷の上に石を滑らせる場合、ある方向に走り出した石は摩擦がなく障害物もない時には同じ方向にいつまでも走り続けるに違いない。速さや向きを変えるには「力」が必要で、速さの変化(加速度)は力の大きさに比例し、石の重さ(質量)に逆比例する等々、力学の基本法則の像が心の中で描けることになる。大学時代にマイクロ波を扱うようになった時、その振る舞いを心の像に描こうという望みを持ちました。力学と違ってもともと見えない現象であり、かつ、電気的作用と磁気的作用の結びついた複雑な現象であるので、その達成は容易ではありませんでした。

旧制高校卒業後、東京大学物理学科に入りました(1943年)。当時、第二次大戦も大詰めの段階で、入学と同時に授業の傍ら研究室に入って「戦時研究」をすることになりました。熊谷寛夫先生のもとで、初めてマイクロ波(波長の短い cm オーダーの電波)[photo 2]を手がけることになりました。当時作られたレーダー(電波探知機)の中核で、光のように直進し物にあたると反射する、夜間でも船舶などを容易に発見できる、この技術の発達した米国によって、多くの日本の船が沈められました。熊谷研究室ではマイクロ波の発生や受信の技術が研究されていて、私もB29爆撃機のレーダー波長の実測装置の製作に加わって、空襲中の測定も試みました。

敗戦後、東大の理工学研究所で予算がほとんどゼロの時代、神田の闇市からB29の受信用真空管を買って実験をしました。このマイクロ波で遊ぶ中に基本的には光と同じ特性を持つこと、電波の進行方向と電気力の方向の関係など、研究室でみんなわいわい討論をして、よい勉強のできた時代でした。手細工でマイクロ波の回路を作ってその性質を体得しました。

そうこうする中に、日本でも「サイクロトロン」(水素の原子核、プラスの粒子などを高い速度に加速する装置)の製作が許されるようになったので、熊谷先生のもとでまず小型のサイクロトロンを手作りで製作、ついで原子核研究所の大型サイクロトロンの建設に携わったのです。サイクロトロン用の発振器はマイクロ波の原理に基づいて考え、小型のものが手細工に近かったのでメカニズムはよく理解できました。大型サイクロトロンは全国の研究者の共同利用ということで粒子の加速を変えられることが大きな特徴がありました。そのため、高周波電圧の周波数も変えられるというユニークなものでした。研究所在職中、菊池正士所長をはじめ、数多くの盟友を得ることができました。妻、敬子との出会いも駒場の東大理工研でした。

サイクロトロン建設に尽力した後、原子核研究用の放射線計測装置の整備に力を入れていたのですが、エレクトロニクス先進国の研究をこの眼で見たいとの願望から米国行きを決意、小田稔氏の紹介でボストン MIT の放射線物理研究所に渡りました。そして1年後、ベル電話研究所に移り、研究員(Member of Technical Staff)として人工衛星用の放射線検出装置の試作に携わりました。東京大学の海外留学期限は3年間でしたので、帰国か、滞米かの大きな決断に迫られたのですが、課長のブラウン氏(W. L. Brown)の尽力で新しいポストに移ることができ、東京大学を辞してベル研究所の正式の研究員となることになったのです(1966年)。ゴールト部長(J. K. Galt)の意中にあった研究テーマは、なんと、かねがね期待していた「半導体レーザー」そのものであったのです。

部長はかねてより通信技術の将来は「光」にあり、もし半導体レーザーが室温で連続発振が可能になれば、通信技術に革命をおこすと信じていました。まだ生まれて間もない半導体レーザーを前にして、このような予測は大変な先見性のあるものだと思います*¹。彼は化学屋のパニッシュ(M. B. Panish)を採用し、その相棒としての物理屋を求めている時だったのです。2人共に半導体レーザーの専門家ではなく、それぞれの道に経験を持った人間という、ゴールト氏の意にまさに合致するものでした。2人は早速に研究準備に入りたかったのですが、どのような攻め方をするか見当もつかぬ状態でした。

パニッシュは Ga 溶液からの GaAs 結晶の成長法を開始、私はできた結晶の発光特性の評価に手をつけました[photo 3]。研究の模索を続ける中、我々は偶然にも Al を加えた (Al・GaAs) 結晶は、(GaAs) 結晶との間にきわめて綺麗な接合面を作ることを見つめました[photo 4]*¹。そしてこのような結晶は GaAs から流出する電子を堰止める役をさせることもできると思いつきました。これはレーザーの室温発振を容易にするのに役立つかもしれない、と早速レーザー構造の改造に力を注ぎ始めたのです。その甲斐あって室温発振のしきい値を従来値の約10分の1 ($10\text{KA}/\text{cm}^2$) まで下げることに成功しました。しかし、これ以上の低下は困難であることもわかりました(1968年12月)*¹。1つのヘテロ接合で電子のひろがりを抑えても不十分なら、GaAs 発光層の反対側にもヘテロ接合を付けた3層構造が必要であると悟り、その構造を作る努力を始めました。この製作には新しい結晶成長装置が必要でした。しかし、この新装置を用いても、レーザーのしきい値電流値を下げるのはあまり容易ではありませんでした。パニッシュが熱心な助手のサムスキー (Sumski) を相手に大変な苦勞をしてレーザー構造の改良を続ける中に、次第に特性の良いものができるようになり、1970年6月1日午前10時、ついに室温連続発振が達成されたのです*¹。この成功を見て、ベル研内の多くの人たち、そして副所長まで祝福に部屋に入って来てくれました。

室温CW発振は、確かに大きなブレークスルーでありましたが、半導体レーザー技術は、まだまだやっと一人立ちのできた赤ん坊のようなもの、実用化には時間がかかりそうでした。当時ベル研では、次世代の通信用としてミリ波技術が大規模に研究されている状態、今、急に光へ切り替えるわけにはいきませんでした。

一方、日本では多くの企業がレーザーの成功に色めき立ち、それに加えて光ファイバーの低損失化の報もあって、光通信に向かって一斉に立ち上がり始めました。これを機に祖国日本に帰ることを考え、今回は大学でなく民間企業に入りたいと思い、友人の助言をもとに71年の秋、帰国して日本電気中央研究所にフェローという特別研究職として入所することになりました。

半導体レーザーは本当に使いものになるだろうか？ 世界中誰もその答えを知りませんでした。ベル研での実績は、良品率はきわめて低い10分の1またはそれ以下、良品でも発振の減衰がある。半導体デバイスは一般に長寿命と思われていますが、発光するものについては必ずしもそうではないらしい。通信に使えるには少なくとも何万時間という寿命が必要です。現在、「何分」という寿命が「何万」になるだろうか？ 不安な思いに駆られながら研究に立ち向かわねばならなかった気持ちは、今も忘れることができません。しかし、長寿命はきっと達成できると自らに言いきかせたことでした。何人

かのグループを持つ南日康夫研究室で、考えられる劣化の可能性を一つずつ試みながら、信念を持って行動するしかありませんでした。

探索を重ねる中、一つの大きな発見がありました。劣化したレーザーの中に暗い線がある！劣化したレーザーの米粒より小さい中身をのぞいて見たいという米津宏雄の執念でした(1973年)。暗い線からその発生源にある黒い点(結晶に内在する微細な欠陥)につながっている、欠陥の少ない結晶ではどうか？と対策を立てました。少しずつ寿命の長いレーザーが生まれてきたので、私は2000時間のデータを持って、国際会議(Device Research Conference)の演壇に立ったのです。私の次に講演するベル研の研究者がこれを聞いてあわてました。彼らのデータは我々のとほとんど同じ、しかも200時間短かった。我々の記録は常に世界最長でした。

米国から帰ってレーザーの実用化に携わっていた頃、多くの企業の研究者たちとも親しくなり、基礎的な問題についてはたとえ競争相手の企業研究者の間でも、私は討論をするように勧めたのです。このことも、日本のレーザー研究が盛んになった一因かもしれません。これらの討論を通じて仲良くなった「半導体レーザーの仲間」たちが自分を囲んで一夜の宴を開いてくれました。長い努力の後の、何より嬉しい心あたたまる時間を過ごしました。この宴はその後も何年も続いています。学習院の校風に影響された性格がこのような輪になったことと感謝しています。

こうして日本の企業群は、海外の後追いをすることなしに一斉に実用化に向けて走り出したのです。「我々は世界の先頭を走っている」という自負がありました。実際、半導体レーザーは世界市場において大半のシェアを占めました。上述した企業間の競争と協力は大きな原動力でした*2。そして光通信システム、コンパクトディスク(CD)、光プリンターなどが実現されました。

80年代に、「光共研」と「光技研」(通称)という2つの研究所がスタートしました。光共研は光電子集積(通称 OEIC)という目標をかかげ、このために必要な材料技術の研究しました。その結果、GaAsのような化合物半導体デバイスを Si の基板の上に取りつけることは非常に難しいという結論でした。一方で、当時 OEIC として考えられたものは錯綜した光通信網の節目に置く切替えスイッチ回路でした。このような簡単な回路ならば、苦勞して OEIC を作るより個別に作った光回路と電子回路を一つの函の中に並べればよいということになりました。

本当に光回路と電子回路を合体して「光電融合システム」が必要なのは、たとえ作ることは難しくてもそれによって合体集積しなければできない高性能の場合です。1チップのコンピューター(またはマイクロプロセッサ)はこの場合です。なぜ有効かとの理

由は、電気集積回路では電子素子(トランジスタ)間の信号は金属配線で伝えられ、電子素子の製作技術は日進月歩で素子の小型化が進み、マイクロプロセッサはますます高集積化されます。そして高速化も要求されます。この場合、困ったことに細くなった金属配線の抵抗の増加により、信号の伝わる時間は期待されるほど短くなりません。厳密な計算によればマイクロプロセッサ上の数センチの長さの「遠距離」配線は、いろいろ工夫しても金属の配線ではとうてい要求には応じられません*³。信号を伝えるのに「光」を用いれば、接続に要する時間は大幅に短くなります。このような「光接続」を利用すれば、3センチでも10分の1以下になります。もちろん「光接続」を実現するにはレーザーなどの光素子を用いて、電気信号を光信号に変えてファイバーなど「光のみち」を用いて目的地に運び、光ディテクターを用いて電気信号に変えねばなりません。上の計算では(電気 \leftrightarrow 光)の変換に必要な時間は織りこみ済みです。しかし、1チップコンピュータではこのような光接続が必要な「遠距離」配線の数は数千個に及びます。複雑なコンピュータを考えれば当然のこと、これを実現するには容易なことではありません。

発光素子の値段は現在のものに比べて桁違いに安価でなければなりません。そして基板となる Si の上に集積する必要があります。これらは現在の1チップコンピュータの考えでは不可能に思われる大きなブレークスルーが必要です。そして、このような新技術が達成された場合にはいろいろ新しい応用が達成されます。その一つは高速に動く画像の処理ができるようになります。現在、この技術に向かっている研究は我が国で始まっています。動く画像を細かく分割して同時に受光し、比べる方法です。石川正俊は、巧妙に、わずか数箇のチップで行うことを提案して世界でも注目されています。実際に予備実験も行っています*⁴。高速画像処理にも、必要な材料やデバイス技術は「光電融合集積」の場合とほぼ同様です。この他にも新しい装置が作り出されて世の中に貢献すると信じます。

むすび[photo 5]

長年レーザーを中心とする光技術の発展を見つめながら、将来、光がもっと違う形で広く使われるようになるのではないかと常に私の心に疼いていました。「光と電子」は今までのテレビやビデオのような眼で見る画像だけでなく、はるかに緊密に結びつくことによってコンピュータの飛躍的性能向上や、人間の視覚と頭脳をあわせ持つ「老人介護ロボット」などが出現するに違いないと思うようになりました。これを「光電融合」(Photo Electronic Integration)と呼ぶことにしましょう。光電融合は21世紀の大きな夢

であります。

過去の研究生生活を総括してみると大切なことがいくつか感じられます。第一に人との出会いが研究に大きく影響しました。熊谷寛夫先生の研究室に入ったことは、「マイクロ波-光」の物理イメージを通して一生の研究の芯棒となりました。そしてゴールト部長との出会いは、私の後半生を半導体レーザー中心のものに決定づけました。

後に、実用化にあたった時に、「半導体レーザーの仲間」の研究者たちと未知の大問題に出会い、その突破口が若い人々のひたむきな心によって開かれるのを経験しました。

私は平凡な研究者で特別な人間ではありません。ただ物理を「現実の世界」に一例えば半導体レーザーの性質をうまく利用して実用に役立てることが生来好きであったので一生懸命研究に精出したということです。

「研究は未知への挑戦」です。私は幸い、いくつかの答えのわからない問題に遭遇しました。半導体レーザーの常温発振は可能であるか？そして実用化の難問題にぶつかった時でも、自分の信じるところに従うしかありませんでした。後に専門の研究会で光電集積の応用を研究して得られた結論は、電子回路のみを用いた計算システムの本質的問題点は内部信号の遅れである、これは大幅な光回路の導入によってのみ解決される、ということでした。このために必要な「光電子融合」は21世紀の大事業と信じます。これが実現すれば大きな応用が期待できるに違いありません。夢をもって強くがんばることが大切です。若い世代、年輩の世代、力を合わせて人類社会のために努力すれば達成できます。

終わりに、私の生涯にわたる研究成果に対して、このような名誉な賞をいただいたことは身に余る光栄です。私の人生にとって、大きな節目となりました。自分の今日あるまでに携わってくださったたくさんの方々に改めて感謝の心を表したいと思います。

*1 I. Hayashi, "Heterostructure Lasers," *IEEE Electron Devices*, Vol.ED-31, No.11, pp. 1630-1642 (1984)

*2 伊藤良一, "半導体レーザー," 光学24巻, 8号, pp. 486-494 (1995)

*3 林 巖雄, "光と電子の集積化," 応用物理65巻, 8号, pp. 824-831 (1996)

*4 石川正俊, "超並列、超高速視覚情報システム," 応用物理67巻, pp. 33-38 (1998)

謝 意[photo 6]

- ・ 学習院恩師、友人
- ・ 熊谷研究室 協力者、友人
- ・ 東大理工学研究所および原子核研究所 協力者、友人
- ・ M. I. T. 放射線物理研究所 協力者、友人
- ・ Bell 電話研究所 基礎研究部門(ゴールト部長、ブラウン課長) 開発研究部門 協力者、友人
- ・ 日本電気、中央研究所および半導体、光関係 協力者、友人
- ・ 日立、三菱、富士通、東芝、松下(半導体レーザーの仲間) 協力者、友人
- ・ 通産省プロジェクト 光技術共同研究所 協力者、友人
- ・ 光技術研究開発株式会社 協力者、友人
- ・ U-OEIC 研究会(光融合システム)、光産業技術振興協会 協力者
- ・ 応用物理学会
- ・ 日本工学アカデミー

その他お世話になった多くの方々

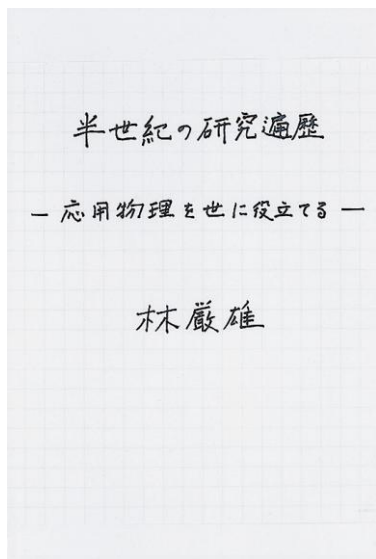


photo 1

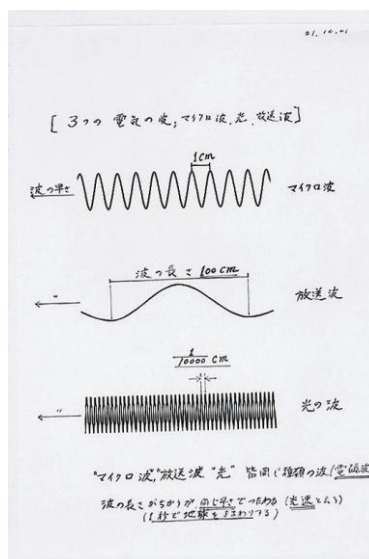


photo 2

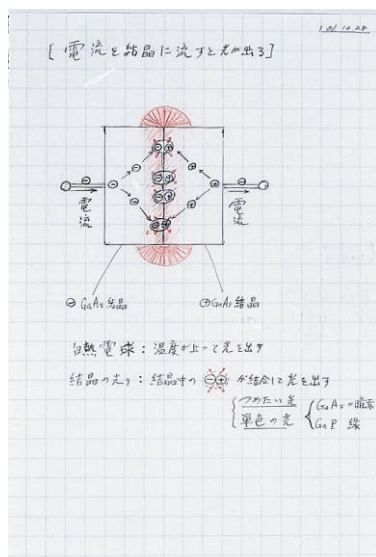


photo 3

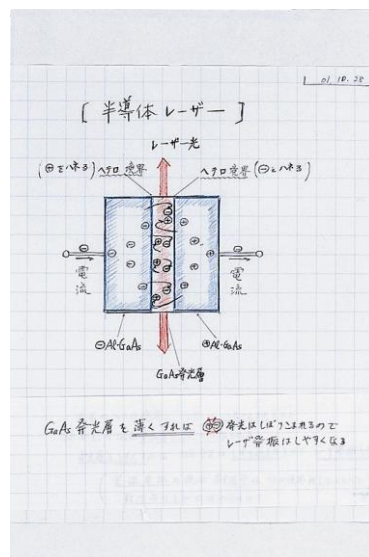


photo 4

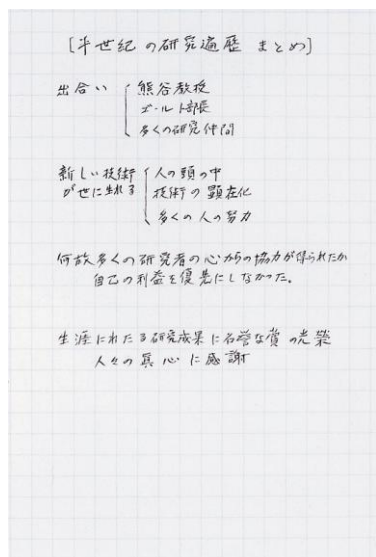


photo 5

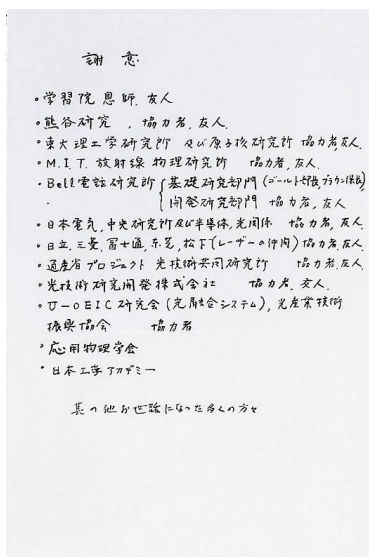


photo 6