

# 明るい電子回路 —電子回路教育のポイント—

谷本 洋 (北見工業大学)

Enjoyable Electronic Circuits — Some Important Points —  
Hiroshi Tanimoto (Kitami Institute of Technology)

The author's experience in teaching electronic circuits course is discussed in view of how to make the course more enjoyable. Some examples of effort done in the author's institution are presented for enhancing recognition of electronic circuits.

キーワード：電子回路教育，電気回路，電磁気学，実験と実体験，シミュレーション，A-ha! 体験  
(Electronic circuit education, electrical circuits, electromagnetic theory, experiments and experiences, simulation, A-ha! experience)

## 1. はじめに

「電子回路は，だれでも教えられると言われているが，プロでなければ，教えられない」と多くのベテランの先生方がおっしゃっており，経験豊富な先生方は，みなさん共通した何かをもっていらっしゃるのではと考える。具体的なお話やエピソード，昔と今の違いについてなど，電子回路ならでは教育のポイントについてお話を伺いたい。

以上が，筆者がパネリストの依頼を受けたときのお題目であった。何やらわからないところもあるが，電子回路の教育に関して実践していることを説明せよ，と言うことだと解釈して進めさせていただく。

電気電子系の教員の間には「電磁気と電気（電子）回路は基本中の基本であり，電気系の教員ならば誰でも教えられるはず」という誤解(タテマエ?)があるようだが，本当は，どの科目でもその道のプロでなければ教えられないことがあるのは当たり前である。本文では，企業において LSI の回路設計で長年禄を食んできた筆者が，大学に移って電子回路を教えるという立場に転じて感じたり経験したことを元に，どうすれば暗く見られがちな電子回路を明るく教育できるか論じてみたい。

それには教員個々人の（電子回路の）学習史が深く関係していると考えるので，まずそこから入りたい。

## 2. 電子回路との出会いと学習

ある個人にとって，電子回路と幸せな出会いができたかどうか，その後の電子回路人生を方向付けると思うので，まず自分のことから反省してみよう。

〈2・1〉 筆者の電子回路体験など 筆者も大方の回路

オタクの例に洩れず，小学生のころから回路いじりをしてきた。もちろん，意味はわからないが，非常に楽しいものであった。たとえば，貰った UY-76 が一本ある<sup>1</sup>。これを使ってどんな回路を作ろうか，ラジオから外したマグネチックスピーカーがあるからアンプにしようか，いや，超再生の受信機が作れるのではないかなど，妄想の世界に浸るのであった。子供向けや一般向けのラジオ雑誌から知識を得るわけだが，実際に製作することは少なく，妄想しているのが楽しかったのだと，今にしてわかる。

最初に電気の手ほどきをしてくれたのは，近所の電気屋さんで，故障したテレビの部品などを貰った。若い頃ラジオ作りをしていた叔父にも半田付けを教わった。

筆者が中学に入った頃，大きく影響を受けたのは同級生の兄で<sup>2</sup>，当時は高校生であった。手書きの回路図をくれてトランジスタなど必要な部品も頂いた。自分で回路図が書けるとは，どんな勉強をしたのか？そんなことができるのは日本に 100 人くらいしかいないのではないかなどと思っていた。父の知り合いの農林省 (!) のお役人からも，自宅に招かれ若い頃に集めたと言う部品の山を頂いた<sup>3</sup>。当時，アマチュア無線の送受信機も出来合いのものは高価で，多くの人が自作しており，ローカルのアマチュア無線家の OM が手助けをしてくれた。かように，回路オタクの少年がい

<sup>1</sup> 真空管 (ST 管) の名称であることさえわかれば，あとは話の内容に関係ない。関根慶太郎先生が聞けば手をたたいて喜んだろう。筆者の真空管に対するノスタルジーである。

<sup>2</sup> 最近，新聞を見たら名前と写真が出ていて驚いた。写真には 45 年前の面影があり，今は某航空会社の社長であった。

<sup>3</sup> 今にしてわかるが，精魂こめて蒐集した部品は不要になったからとて棄てるに忍びない。相手が子供であっても，宝物はそれを役立てられる人に貰ってほしい，と考えたに相違ない。先の友人の兄も，回路いじりをやめる決心をしたところだったのだろうか。

ると、地域の人々がサポートしてくれたのである。

さて、時代はちょうどフィラメントの輝く真空管が消えて冷たい半導体に座を明け渡した時期であったが、大学に入って電気回路や電子回路を学ぶと、それまでよく理解せず適当に回路定数を変更して楽しんでいたアンプ等の電子回路が、綿密な設計に基づくものであり、いちいちの定数や回路構成に意味(=設計意図)があるのだということを知った。それとともに、何か電子回路の神秘性が失われたようにも感じた。同時に、自分にも回路図が書けるようになるかも知れないと思ったのであるが、実際はオーディオアンプなどを作っては壊す毎日だった。当時は Hi-Fi セットを手に入れるには相当にお金がかかり、自作したほうが同レベルのものが相当安く手に入る、という実益もあった。

大学院での研究対象は「磁気変調器」と言うもので、強磁性体を用いた一種のパラメトリックアップコンバータであった。その実体は鉄心(実際はフェライト)と銅線であり、一般常識からはとても回路の研究をしているようには見えない代物であった。実際、技術的には第 2 次世界大戦中の技術であり、その後 SQUID に押されて今では全く見かけない、失われた技術となった。しかし、研究を通して、回路素子における対称性とか変調ということについての理解を得ることができたように思う。

大学院を通して電子回路を教わったという感覚はなく、同輩先輩先生との議論によって鍛えられ、自から考える方法が身に付いたように感じている。

さて、学位を得て電気メーカーに就職すると研究所へ配属されて、アナログ LSI の研究開発を担当することになった。電子回路が専門だと自称してはいたものの、鉄と銅を相手にしていた者がシリコンを相手にすることになった。他に本がなかったのも、例に洩れず、アナログ集積回路は Gray & Meyer<sup>(1)</sup>と Grebene<sup>(2)</sup>に学んだ。

入社当時(1980年)、日本ではまだ SPICE が普及しておらず、大手半導体メーカーで使われ始めた時期だと思いが、配属先には SPICE のソースコードをいじっている人たちがおり、CAD 関係の輪講に参加させて頂いた。当時の SPICE には結構バグが残っており、設計者はバグ取りしながら設計していた<sup>4</sup>。SPICE の中身を知ったことは、あとでミクサや SCF の雑音解析をするのに大変役立った。会社では、SCF、連続時間フィルタ、電話交換機の加入者回路、 $\Delta \Sigma$  型 AD 変換器、LNA、ミクサ等の通信用アナログ LSI の設計に携わった。

**(2・2) 電子回路の学習** 筆者が大学の学部で教わった「電子回路」は集積回路を前提としたもので、ディスクリット回路について教わった記憶はない。今思えば、我が師は UC Berkeley 帰りの先生で、Gray&Meyer ばりの電子回路<sup>(3)</sup>を講義していた。このことは就職後に文献<sup>(1)</sup>を読んで初めて気付いたが、学生のときは正直、意味不明で

あった。なにしろ、エミッタ接地増幅回路の電流帰還バイアスすら詳しく説明せず、「バイアスとは動作点を定めることだ」の一言で済まされた。たしかに LSI では電流源でバイアスを定めることが殆どで、ディスクリット回路の常識とはかなり異なり、むしろ簡単な面もある。

筆者が就職した頃は、設計は SPICE で検証するが、まだブレッドボード(BB)を作って実験も並行して行っていた。実験には思わぬ効用があった。シミュレーションでは調べたことしかわからないが、ハードウェアシミュレータである BB では頼んでいないことまでシミュレーションしてくれる。例えば、発振すべき回路は勝手に発振してくれる。SPICE では色々な条件で過渡解析をしなければ発振しなくても、である。「SPICE で動かない回路は製造しても動かないが、SPICE で動く回路を製造しても必ずしも動くとは限らない」と言うことを知った。

社会に出てからも、同僚や他社や大学の先生方には回路について種々議論してもらったりアイデアや情報を頂く事はよくあったが、基本は専門書を読んだり論文に当たったりで自学自習であった。その道のプロならばどの分野でも同じであろうが、ヒントは貰ったとしても、基本的な事は自分で考えられなければ仕事にならないから、これは当然である。考え方ならば電子回路の専門家ばかりでなく、色々な分野の方々から教えられることが多い。しかし、全てを教えてもらおうという考えは、そもそも間違っていると思う。大切な事は自分で考え、理解しなければ身に付かないのは当然であろう。

**(2・3) 実体験・実験の大切さ** 筆者が大学に来て最初に驚いたことのひとつは、電気電子系の多くの研究室がシミュレーションに明け暮れており、あまり実験をしていないことであった。筆者は SPICE でシミュレーションの洗礼を受け、深く帰依するようになってはいたが、いかに SPICE が素晴らしくてもモデルがいい加減ではまともな結果が得られないことを、経験により痛いほど知っていた。

アナログ LSI の設計は、否応無く「動いてナンボ」の世界であり、自分の(シミュレーションによる)設計は現実のチップによって自ら検証しなければならず、不具合が発生した時にシミュレーションでは大丈夫だった、と言っても何の役にも立たない。仮にプロセスの不具合やシステム設計の問題が原因で起った不具合であっても、プロセスあるいはシステムに原因があるという証拠を提出できなければ回路設計者が責任を取るしかないのである。なぜなら、プロセス屋さんは自分で LSI 全体の評価をする技術を持ち合わせておらず、システム屋さんは全体として不具合であることはわかっても、その内部原因は追究できないから、具体的な証拠を出せるのは回路設計者しかいないのである。このように、LSI の設計者は自分よりひとつ上の階層と下の階層についてもある程度通じている必要がある。

全体として、本章で述べたようなことが筆者が電子回路の専門家になる動機付けになった背景であり、電子回路の

<sup>4</sup> 筆者も MOS2 モデルの部分にバグを見つけて修正したら、DC の収束まで早くなったのには驚いた。専用にチューニングした SPICE を持つ人もいた。

専門家として働く中で感じてきたことである。電子回路に限らず、筆者が感じたようなことは何かを設計するという事に共通した事柄であると思うし、こういったことを若い世代に伝えたいわけだが、その前に大きなハードルがある。

### 3. 電子回路に興味を持ってもらうには？

会社を辞し、大学に赴任して実際に講義をするまでは、電子回路は自分の専門であるし、色々苦労して学習してきた経験もあるので学生に教えるのは楽勝だろうと多寡を括っていた。しかし、最初の 1 年で実際に講義して悟ったことは予想とは全く違っていた。真の問題は電子回路で教える内容や、それが難しいことではなく、学生がそもそも電子回路に価値を見出せず、全く興味を持っていないことだと気付いたのである。

教わる方としては、聞きたくもない話題を聞かされるのは苦痛でしかないだろうし、教える方にしても、こんなに張り合いのないことはない。何年か悶々としていた。立ち直りのきっかけは、やる気があり、育て甲斐のある卒研究生が来たこと<sup>5</sup>。彼らと話していて、状況を変えるには「鳴かせてみようホトトギス」の態度しかないと思えるようになった。それには当方のやり方を変えるしかない。

**〈3・1〉 電子回路の認知促進活動** 電子回路は 2 年次から開講しているが、2 年生から始めても手遅れだと言うことで、1 年生から始めた。折よく初年次教育の一環として、入学した 4 月から電気電子工学科の 1 年生全員が学科の全研究室を順番に見学する「電気電子工学序論」という科目があったので、その時間を利用して電子回路に関心を持ってもらうべく啓蒙活動をはじめた。以下はその様子である。

**ある日の研究室見学** 見学に来た 1 年生にいくつかの質問をする。

1. LSI を知っているか (聞いたことがあるか) ?
2. LSI を見たことがあるか?
3. LSI をいま持っているか?

最初の質問は過半数が YES と答えるが、2, 3 については NO が殆どである。要するに、LSI というものが存在するのは知っているが、具体的なモノとしては知らないし、持っているという意識もない。

LSI の中身は電子回路だと説明し、「先生には君たちが LSI を身に着けているのが見えるんだがなあ」と聞かけると、「携帯ですか?」「ウォークマンね」、「腕時計もそうですか?」などと反応がある。無反応の場合もあり、ガッカリするが、そこで、携帯電話機を分解したものを取り出し、「この黒くて四角いのがみんな LSI だよ」と実物を示して教える。実物の提示は威力絶大で、近寄って見ようとする。それからブランクのシリコンウェハを取り出し、「これがシリコンだよ、この上に LSI を作るんだ」と見せる。「君た

ち LSI の中を見たことがないと言っていたが、ここに顕微鏡があるから、観察してもらおう」と言って、実体顕微鏡で 741 から始めて年代別に何種類かのチップを見せ、時代とともに非常な勢いで微細化が進んでいることを説明する。最後に、我々の研究室の学生たちが設計したチップを見せると、はじめて自分たちと関係のないレベルの話ではないと気付く。

「お〜、どうやってこんな小さいものを作るんだ? よく見えねーじゃん」などと言いながら顕微鏡を覗いているので、プロジェクタが小さな原版を大きく拡大するのは逆に、小さな原版を光学系で縮小投影して微細なパターンを描くことを説明する。

ここからは、家電製品や電気製品を挙げさせ、その中に LSI が入っているか、入っていればどのような働きをしているか、対話によって引き出して行く。最終的には、マイコン炊飯ジャーで炊いた朝ごはんを食べ、セキュリティカードで図書館に入って勉強し、PC でネット検索してレポートを書き、学食では学生証兼プリペイドカードの支払いで昼食をとり、暑いので研究室の冷蔵庫を開ければセンサーが働いて適度に冷えたアイスを食べ、帰宅時に車に乗ればそれはマイコンだらけで動いており、スマホは使うは DVD は見るは、朝から晩まで LSI の世話になって生活していることが自覚される。

「LSI の入っていないのはカノジョくらいだ」などという冗談が出る。そこで、カノジョにも電子回路が入っているかもしれないと、心臓の悪い人に埋め込むペースメーカーの話をして、医療機器にも大量に LSI が使われていることに気付かせる。もちろん、発電所だって、その制御のためにコンピュータを使っており、その中には LSI が大量に使われていることを説明する。

もしも LSI がなかったらどうだろう、という話をすると、とても生活できそうもないと言う。しかし、「先生はテレビの本放送が始まった年の生まれだけど、小学校に入る前は家にあった電気製品は電球とラジオと電気アイロンだけだったよ」、という学生は仰天する。

たった 50 年ほどで、日常生活が LSI のおかげだけではないけれども、技術の進歩でこのようなところまで進歩したということが、現代の学生は教えられないとわからない。なぜなら、今ある大概のものは彼らが生まれたときには既にあつたから、これらのものがない世界は考えられない。

このように電子回路が大変身近でかつ重要なものであるという事を理解してもらい、関心を持つように日々努めているが、効果のほどは不明である (測定法がわからない)。

残念なことは、これらのものは我々の世代が努力して、より小さく、より便利に、機能に関係のない余計なものが見えないように改良を重ねてきた製品ばかりであるが、初期の姿とは結果的に外見から内部構造まで知るのが難しい姿に変わり果てていることだ。たとえ開けてみたとしても LSI しか入っておらず、LSI の中とはといえば専門家が見てもわからないほどだ。LSI の技術を推進したのは、後進を育て

<sup>5</sup> STARC に研究課題が採用されたことも大きい。とにかくアウトプットを出さなくてはならなくなった。

るという意味からは、自分の首を絞める行為だったのか？

〈3・2〉 学生の気質など 研究室見学における学生との対話で、講義では気が付かない色々な事に気付かされる。

- 受動的。教えられていない事は知らないし、知る必要がないと思っている節がある。そんなに大事なら学校で教えるはず。自分で調べるものとは思っていない。色々なことに関心が無いのではなく、関心を持たないように教育されているのではないか？
- 知識の量が少ない。せつかくある事に関心を持って、他の事柄と関連付けるには知識が十分でない。
- 自分で考える訓練が足りない。疑問に対してすぐに答えを聞きたがる。あるいは、答えは全て既知であると思っている節がある。先生は知っているのに意地悪で教えてくれないのだ... と思っているかのようだ。
- 実物を（動かして）見せる事は非常に効果がある。逆に言うと、ただ言葉で説明してもなかなかわかってもらえない。画像が無いと受け付けられないのは、ラジオが流行らないせいで想像力が弱っているのか？
- 質問はしない。どうも、何がわからないのか、適切に表現できないからのようだ。また、簡単な質問をして馬鹿にされるのを恐れている節もある。あるいは、後でこっそり聞きに来る学生もいる。皆の前では恥ずかしいのか？

#### 4. 明るい電子回路に向けて

「ベテランの先生は共通した何かを持っている」ということ自体はそうなのかもしれないが、そもそも筆者は自分の教わった 2 人の先生以外に電子回路を教わったことが無いので、判断ができない。社会に出てからも、基本は専門書を読んだり論文に当たったりで自学自習であった。基本的な事は自分で考えられなければ仕事にならないのだから、何でも教えてもらおうという考え自体が間違っていると思う。大切な事は自分で考えたり理解しなければ身に付かない。

自分が学生の頃、どこがわかり辛かったも今ではよくわからなくなっているが、長年講義をしていると、次第に学生が電子回路のどこで躓くかがわかってくる。いくつか挙げてみよう。

##### 〈4・1〉 理解しにくい点の例

**電流と電圧の向きに関する規約** まず、電気回路がよくわかっていないという問題がある。特に、電気回路の教科書<sup>4)</sup>の 1 ページ目の最初の図に書いてある、電流の流れた向きとは逆に電圧降下が発生するという約束事を遵守せず、回路方程式を立てるとき電圧降下の向きを気分によって変えるのでおかしな結果になる。これは徹底して叩き込まなければならない。

**バイアス** 筆者自身もわかりにくいと思ったものに、「バイアス」あるいは「動作点」と「線形近似回路」の概念がある。電子回路は非線形回路であるから、回路方程式

も非線形になり、そのままでは解けない。そこで、解ける式を得るために、動作点付近における微小な変化分について方程式を立てて、線形の回路方程式で近似する。

これは数学的にはテイラー展開して 1 次の項までを取ることに相当するが、解析学と電子回路は異なる科目であるためか、同じ内容だと言う事に気が付かない、あるいは別個のものとして記憶しようとする学生が多い。

**無視できるかどうか** また、電子回路でよく持ち出される、「 $a \gg b$  だから、 $b$  は無視して計算する」という場合、「どれくらい小さければ無視できるのか？」ということも難しいようである。答えは、もちろん、「場合による」であるが、場合というのは、あなたがどのくらいの近似精度を必要としているのか、ということであるから、ふつうの学生には答えられなくて当然である。これに関しては、電子回路では部品の素子値が 10% くらいずれるのは普通なので、これくらいの精度で計算できればよいと教えている。ただし、高次の微量量というのがわからないらしく、 $0.1^2=0.01$ 、 $0.01^2=0.0001$  などと、具体的な数値を挙げて説明するようにしている。

**数式ばかり** さらに、電子回路では数式ばかりいじっていて、ちっとも回路の動作がわからない、というクレームもある<sup>6)</sup>。これはもつともだと思ふ。普段から、聞いているだけではわからないから自分で計算してみろ、回路になったつもりで動作を考えてみると言っているのだから、なかなか実行しないようだ。講義に関連した実験（必修）も並行して開講しているが、実験は実験、講義は講義で別物ということらしい。

詰め込まなければ何も取り出せないのだから、知識としていろいろなことを覚えるのは大切である。しかし、覚えたことが使いこなせないのでは覚えた意味がない。使いこなす、というのは、ばらばらの知識を関連付け、つなぎ合わせて大きな体系にまとめる、ということだろう。この作業は自分でするほかにないのである。

さて、つぎに現在進行中の取り組みについて説明する。

〈4・2〉 興味を持たせるための取り組みの例 これは講義の話ではなく、卒業研究で我々の研究室に配属された 4 年生への動機付けの一例である。

我々の研究室では配属された 4 年生には各自の卒研テーマに本格的に取り掛かる前に 2~3 名のグループに分けて「基礎練」と称して、卒研で必要となる基本的な事柄を教えてきた。年によって違うが、たとえば、ある年は Razavi の本<sup>5)</sup>の輪講で電子回路の復習をしてもらったり、ほかの年はオペアンプを設計させ、それを個別部品で試作し、手設計、シミュレーション、実測の比較をさせたりしていたが、いまひとつ対象に興味を持っていないようで、単なる作業になっている憾みがあった。

<sup>6)</sup> 講義の最終回に行うアンケートの自由記述欄を見てはじめてこれがわかる。翌年にならばフィードバックできない甚だしい無駄時間系である。

今年は、昨年度の卒業生が不要になったエレキギターを置いて行ったので、これを材料にエレキギター用のアンプを設計・製作させようというアイデアを思いついた。これなら具体的な用途や目標が明らかで、しかも、全員の関心がある楽器や音楽に関係していて面白そうである。

そこで、次のような大まかな手順だけ指示して設計・製作してもらった。中間結果は毎週 1 回ある研究室全体のゼミの時間に報告してもらうこととした。

- まずギターアンプの仕様を作成し、それを満足するようにアンプを設計せよ。必要な仕様の項目も考えよ。
  - ▷ ゴールを明確化するため、仕様の重要性を認識してもらうのが目的。仮に、設計を外部に依頼するとなれば、行き違いが生じないためにはどんな仕様項目が必要か、考えてもらう。
  - ▷ 仕様策定の際、ギターの出力電圧や内部抵抗等は不明なので実測しなければならない。また、アンプの出力電力は実験室にあるスピーカーを鳴らすので、予備実験して音の大きさから決める。これらにより、信号源と負荷の性質を認識してもらう。
  - ▷ オシロスコープ、インピーダンスアナライザ、発振器等、日常使う測定器の使用法がわかるようになる。
- 電圧増幅段は部品箱にある OPAMP を使ってよい。出力段だけ設計せよ。まず、手設計してからシミュレーションを行ない、両者を比較せよ。必要なら実験せよ。
  - ▷ 回路設計は初めてであろうから、エミッタフォロワの設計から入ってもらい、出力段を自ら決めた所定の動作点に持ってゆく方法を学んでもらう。手計算とシミュレーション結果は同じにならないので、その理由を考えてもらう。
- 机上設計ができたなら、必要な部品を部品通販のサイトから探し、一覧表にまとめて先生に発注を依頼せよ。
  - ▷ 自分たちの必要な部品の「仕様」として、何を指定しなければならないかがわかる。抵抗一本にしても、抵抗値だけでなく、種類と電力定格、精度を指定する必要がある。また、常識として、各種部品の価格を知ることができる。
- 部品が届いたら、実際に回路を製作し、設計どおりに動作しているか確かめよ。
  - ▷ 設計どおりに動作する可能性はまずないので、シミュレーションとどこが違うか調べることになる。この過程から、モデルパラメータが正確でないことが得られる結果も現実とずれることを理解して欲しい。また、どこをどう修正すれば設計値と合うようになるか、考えてもらう。
- 動作を確認したら、出力段だけの出力抵抗を測定し、設計値と比較せよ。なぜ同じにならないか？
  - ▷ 大概の学生は能動回路の出力抵抗を測定したことがないので、それを考えさせる。測定方法も色々あるだろう。

- 最後に電圧増幅段と接続して負帰還をかけ、設計どおり動作しているか確認せよ。また、負帰還がある状態で出力抵抗を測定せよ。結果は設計と合っているか？
  - ▷ クロスオーバー歪が見えなくなるようにするには、実回路で出力段のバイアス電流を加減する必要があることを理解させる（出力トランジスタのモデルが他人のものだから合わないは当然）。
- 完成したアンプの出力電力対利得の周波数特性、THD を測定し、シミュレーション結果と比較せよ。また、ゼミでお披露目せよ。

ということで、7 週ほどかかって 3 グループがそれぞれのエレキギター用アンプを完成させ、お披露目できた。面白いことに 2 グループは標準的なダーリントン接続のエミッタフォロワで構成するプッシュプル回路であったが、1 グループは pnp のエミッタフォロワで npn のエミッタフォロワを駆動する回路（ダイヤモンドバッファというらしい）で挑戦したため、バイアス電流の設定に苦労していた<sup>7</sup>。

最初、単純なエミッタフォロワのプッシュプル回路を OPAMP で駆動していたが、OPAMP の保護回路が働いて出力電流が制限され、出力段を十分駆動できなかつたため、ダーリントン接続とした由。OPAMP に出力電流制限回路があるとは知らなかったもので、原因がわからず悩んだようだ。その後は OPAMP 等のデータシートを見るようになった。

一方、ダイヤモンドバッファを採用したグループは、高周波の発振に悩まされた。エミッタフォロワの発振について調べるようアドバイスし、ベース側に直列抵抗を挿入することで無事安定化した。

なお、仕様を決めるため、エレキギターの出力インピーダンスを測定してもらったが、数 kHz にピークを持つ共振特性が得られ、想像していなかったので指導する側も驚いた。

なお、ギターが趣味の学生がおり、完成お披露目のときにグゥ〜んペケペケキュー〜んと大活躍した。最大音量でデモしたいとの事であったが、他の研究室からクレームが出そうだったので、残念ながら小さめの音量でお願いした。3 台のアンプはそれぞれ微妙に音が違っており、全員が楽しんだ。

次の課題は、OPAMP の部分を自分達で設計・製作することだと申し渡したところである。

さて、この試みの効果であるが、定量的な判断は難しいものの、学生たちに聞いてみると、面白くてもっと調べたり試したりしてみたいという声が多数であり、かなりの効果があったようだ。それが証拠に、アンプは安定化電源で動作させていたがそれでは持ち歩けないので、今は専用の電源を作っている。また、バイアス電流がどのように決まるのかについて、「あ、なるほど！」(A-ha!体験と言うらし

<sup>7</sup> この回路は元来集積回路として実現することを前提としているので、個別部品回路では素子間のマッチングが悪く、余計な苦労を背負うことになる。

い) と、理屈と現実が繋がったとの声もあった。これは非常に大切なことで、読者も経験があると思うが、何かが「わかった」と感ずる体験<sup>8</sup>は学習の大きな動機付けになる。

今回のように、学生が興味を持っているものと課題の題材がうまくマッチすれば、効果が上がることがわかった。問題は、いつもまいテーマが見つけれられるか、ということである。

教員の指導という面からいうと、回路いじりの好きな学生が1名いたため、多くの問題は4年生同士で相談したり先輩の院生に教わったりして解決し、殆ど手がかからず済んだ。具体的に指導したのは、実験中に巡回していてOPAMPの保護回路のために思ったように動かないことを指摘したのと、出力段発振のヒントくらいであった。また、ゼミでの報告のときに測定の不備を何回も指摘されたため、測定器のマニュアルに目を通すようになり、明らかにおかしい測定結果を持つてくるものが減った。

なお、副次的な効果として、大学の発注システムがどうなっているかと、研究室の経済状態を学生が理解し、急に無理な要求をするということがなくなったことも大きい。

## 5. おわりに

以上、電子回路を楽しく(=興味と期待をもって)学べるようにするにはどうしたらよいか、筆者が行ってきた初年次教育としての研究室見学における電子回路の啓蒙活動の取り組み、および、卒業研究の指導における導入教育としてのギターアンプの製作を例に、考えを述べた。

電子回路に関心を持って貰ってはじめて、その内容に立ち入ることができる。学生の側にも「同じアホなら踊らにゃ損そん」と言うわけで、しらけていないで大いに乗せられて踊って欲しい。

一方、技術者が大学で学んだことだけで一生食べられた事は、中世は別として、いまだかつてなかったと思う。たとえば、医者が開業してから学ばなかったら何が起るか? 考えるだけに恐ろしいことである。技術者と同様であり、進歩の速い時代においては現役である限り学び続けなければならないのであるから、明るく楽しくなければ続けられない。社会人の方々も周りに対して要求するだけでなく、地域の若い人も含めて、自らと若い人たちの学びを明るく楽しくする工夫をお願いしたい。そのような活動から、いづれ電子回路の発展に貢献する人材が世に出てくるものと思う。

最後に、頂いたお題目とかなりずれた議論になったこともお詫びしたい。また、本シンポジウム企画によって考える機会を与えられ、自分自身も活性化した。企画して頂いた委員諸氏に感謝する。

## 文 献

- (1) P. R. Gray and R. G. Meyer: *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*, John Wiley & Sons, New York (1977)
- (2) A. Grebene: *Analog Integrated Circuit Design*, Van Nostrand Reinhold, New York (1972)
- (3) 黒部貞一: 半導体回路, 朝倉書店 (1968)
- (4) 柳沢健: 回路理論基礎 (電気学会大学講座), 電気学会 (1986)
- (5) B. Razavi 著, 黒田忠広監訳: アナログ CMOS 集積回路の設計 基礎編, 丸善 (2003)

<sup>8</sup> 筆者の場合、わかったと感じた前後では理解の次元が一段階違うのがはっきり自覚できる。