

非接触ICカード技術FeliCaと半導体(LSI)開発

サイエンティストになりたいエンジニア 中本 泰

1. はじめに

皆さんは電子立国ニッポンという言葉聞いた事があるのではないのでしょうか？テレビや音楽プレーヤー、パソコン、スマートフォンという電子機器は、LSIという半導体でなりたっていて、日本はその半導体開発で世界をリードしてきたものでした。

中学生時代にラジオに興味を持ち、雑誌記事を参考にゲルマニウムラジオを組み立て音が出た時の感動を覚えこの道に進みましたが、今回はSuicaやICOCAとして普及している非接触ICカード技術FeliCaの話をしたしたいと思います。

最初に、FeliCaの動作原理の話をする。これには普段お使いになっているカードを電氣的に感じ取って欲しいという想いがあります。次に、この開発の事始めから実用化に至るまでの経緯に触れます。開発というものは紆余曲折を経て成されるもので、諦めずに頑張るけど運も必要、風向きは必ず変わるという話です。

そして開発途上で生じた深刻なトラブルと、その解決に関してご紹介いたします。トラブルを振り返ってみますと、トラブルの解決には作法があるという事に気づきます。人間関係のトラブル回避と似て、エンジニアの心構えというような意味合いです。

最後に、そういった事が出来るようになってきた経緯として、著者に知識と考え方を授けてくれた恩師達を紹介しながら、最近話題のSTEM教育についても触れたいと思います。

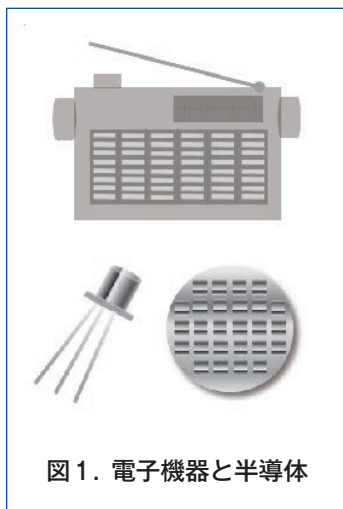


図1. 電子機器と半導体

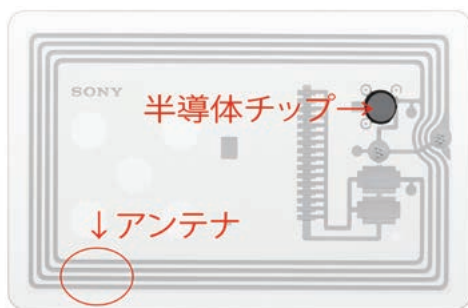
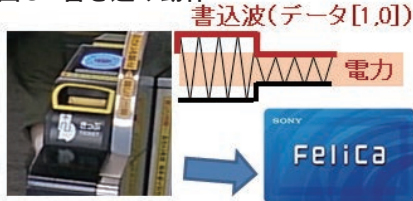


図2. FeliCa透明カード(サンプル)

2. FeliCaの原理：カードへの書き込みとカードからの読み出し

「改札機にカードをタッチするとゲートが開く」という仕組みですが、カードと改札機の間で何が行われているのでしょうか？入場する時はカードに駅名を書き込んで、出場する時に、乗車駅から下車駅の料金を計算してカード残高を書き換えるといった作業がなされていると思います（実際には、もっと複雑だと思いますが）。端的に言いますとカードに対して「書き込み」と「読み出し」という作業が行われており、その様子を図3と図4に示します。

図3. 書き込み動作



ところで皆さんはあのカードに充電した事も電池が切れたという経験もないと思います。実はあのカードに電池は入っていません。ゲルマニウムラジオと同じ原理で、改札機から降り注ぐ電波から電源を作り出しています。

図3に書き込み動作を示しますが、改札機から「1」「0」で振幅を変化させた電波が発射されます。カードではその電波から電力を作り出す（電力検波と呼びます）と同時に、「1」か「0」という情報を抜き取り内部のメモリーに記録します。次に図4は読み出し動作です。書き込みの時とは異なり、振幅の一定な電波がカードに照射されます。これによりカードは電力を得て、動作を開始し内部のメモリーからデータを改札機に向かって放出します。この説明ですと何の変哲もない普通の無線システムと同じではないか？と思われてしまうかもしれませんが、実は大きな技術革新があります。

受信電波から電力を作り出すと説明しましたが、この方式で作りに出せる電力は微々たるもので、データを無線で送信できるほどの電力は作れません（これができてしまうとスマホに電池は不要となってしまいます）。少し難しい言い方になりますが、カードに電波を発射する為に必要な「発振器」がありません（発振器というものは大きな電力を必要としますので）。

図4. 読み出し動作 質問波



読み取り時のカードは、「振幅の一定な」電波を受信しますが、そのアンテナの効率を出力させたいデータの「1」「0」に応じて微妙に変化させます。カード内にあるアンテナは電波を受信する事が仕事ですが、金属ですので、電波の一部を跳ね返します。アンテナの効率を

微妙に変化させるという事は、その「跳ね返り量」も変化する事になります（図4の返事波）。その微小な跳ね返り電波の「1」「0」を改札機側で読み取る事で通信が成立するという事になります。他人のフンドシで相撲を取るようなものですが、これが読み取り動作の説明になります。

3. 開発の進め方：諦めずに続けていれば、運が向いてくる

本章では開発の経緯のお話をします。このシステムの開発はある宅配会社さんから「荷物の自動仕分けの為にTAG（識別子）システムを作って欲しい」という要請から始まりました。1988年のことです。先に説明した「電波の跳ね返り方式」では最大でも10cmほどしか通信できませんので、自動仕分けシステム用には電池を搭載して発振器を積んだ構成としていました。試作機が出来、動作実験を進めていた段階で、コストが要求に対して二桁も高くなってしまふ事が判明し、この案件は頓挫してしまいますが、JRの研究所である鉄道総合技術研究所が非接触カードの定期券を開発しているという情報を入手し、以後、鉄道総研と共に開発を進める事になりました。

同時に、ビルの入退室管理やスキー場のリフト改札等の市場導入を進めていましたが、ここで大きなトラブルに見舞われます。このシステムの電波は長い距離を飛びますので、ビルの壁に反射して目的外のドアが開閉してしまうというものです。当初は導入箇所が少なかったので問題は顕在化しなかったという事です。

更に悪い事は重なります。公共交通機関の安全と安定を担うJRは、「非接触の実用化には時間がかかる」という事で磁気カード方式のプリペイドカードの導入を決定してしまいました。現行事業で前述のトラブルを起こし、先の開発パートナーも失ってしまった。結局、プロジェクトチームは解散する事になり「ご苦労様会」が開催されました。

ところが、その一週間後当時のソニー大賀社長から「カード事業は未来を拓く事業、始めて2年もたっていないのに撤退とは何事か。もう一度挑戦しろ」という指示が出ました。かくして開発再開、まずは「僕たちのシステムの良さ」を必要としているお客様を探すこと



図5. 東日本旅客鉄道の非接触改札

になります。1997年に香港が中国に返還されましたが、その際に「世界に先駆けて」をいくつかやりたい中国政府の意向の中に「地下鉄への非接触切符の導入」というテーマがありました。僕たちはそこに賭ける事にしたのですが、それが後のJR東日本Suica誕生につながっていきます。

開発には研究者の知恵と努力が必要ですが、運とか風向きといったものも必要と感ずます。逆に、運がめぐってきたり、風向きが変わるまで地道にやり続けるという事が大切ということではないでしょうか。

4. トラブルと、その解決からの学び

香港地下鉄の要求の中には「電池レス」という僕たちが当時実現していなかった項目がありました。原理はゲルマニウムラジオですから見込みはありましたが、問題は開発日程です。「落札の為の評価をするので、試作品を1年で揃えよ」という要求がきました。アナログとデジタルが混在した半導体をゼロから開発して半導体自体の試作品が出てくるまで丁度1年かかります。その半導体に手直しをいれて装置に組み込む事でシステムとしての試作機ができます。つまり半導体の手直しの期間を全く取れないという日程でした。そして、1994/12/8に最初のLSIが出来上がり、それをカードに組み動作させたのが翌年年明け。結果は“X”に近い“△”でした。

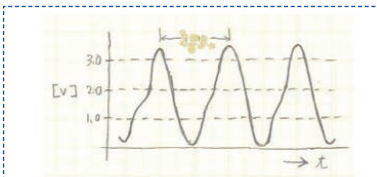


図6. 電源電圧の波形

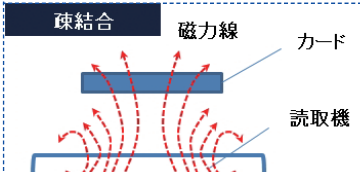


図7. ほどよい距離

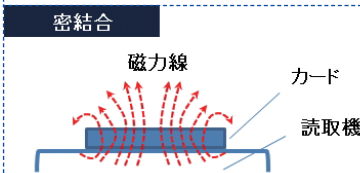


図8. 近過ぎ(密着)

カードを読み取り装置の上空5mmの位置に静止した時だけ通信が成功するという結果です。カードを持った手が震えないように息を止める。さながらレントゲン検査のようでしたが嬉しかった事を覚えています。距離5mmの時だけ成功という事は、遠くても近くてもダメという事です。電波の受信ですから「遠いとダメ」は理解しやすいですが、「近くてもダメ」は理解しにくい。

図6は、カードを読み取り装置に密着させ読み取りができない時のLSIの電源波形で、3V一定のはずが脈打っています。FeliCaの通信原理はスマホのような電波伝搬ではなく、電磁調理器の様な電磁結合です。通信が成功する時は図7の様に磁力線の結合は少ないですが、密着させますと図8のように結合が強くなり大きな電流が流れるようになります。

アンテナに大電流が流れますと、熱によるアンテナ特性劣化で電波を受信できなくなり電源供給が止まります。するとアンテナも冷えて特性回復しますので元の状態に戻り、これを繰り返すこととなります。(つまり電源波形が脈打つ事になります)

カードを密着させると強い結合状態になる事は事前にわかっていて、その最大誘起電圧は60Vと想定していました。60Vもの電圧がかかりますとLSIは破壊されてしまいますので、電圧制限回路を内蔵させましたが、白状しますとその回路が思惑通り動作していなかった。著者の設計ミスと言いますか、当時はまだ知識レベルが低く半導体の細かな動きを想定できなかった事が問題の本質です。原因究明に至る過程は複雑ですので詳細は割愛しますが、2つの重要な示唆があったと思っています。

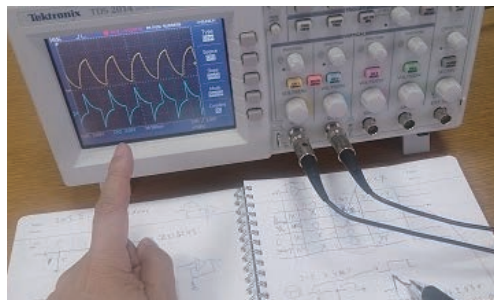


図9. 状況を観察しスケッチする

一つ目は「多くのトラブルは原因が一つではない」という事です。今回は「近くても、遠くてもダメ」という現象でしたので、原因は独立に2つです。病気にしても同じでしょう、一つの原因に帰着させて「それで安心したい」と思うのが人の常でしょうが、その気持ちを抑えてじっくり検証し続ける事が大切です。

もう一つは、状況を観察する目を養う事です。通信NG⇒近いとダメ⇒電源波形が脈打つという順番で評価していきましたが、そこから「電圧制限回路のこの部分を直す」にたどり着くまでに「丁寧に」「あらゆる箇所の」波形観察を行いました。波形観測はオシロスコープという装置で行い、その波形をパソコンに取り込む事ができるのですが、著者の場合はあえて手書きでスケッチします。

「手書き」をする事で、その波形の電圧や時間幅を数値として認知できるようになります。そして、その数値に影響を及ぼす事柄を考えて次の実験を行います。

それが原因解明に繋がるのですが、「PCに取り込んでから」となりますと、実験時の波形の認識が甘いので、原因に近づく為の「次なる実験」に気づけない事が多いのです。これは是非試してみたいと思いますが、著者がそのような考え方ができるようになったのは恩師と呼べる方々の指導があったからだと思っています。

5. モノ造り ～ 科学、数学、技術、工学 の間をゆらゆらと ～

時は遡って、1979年の3月、高校卒業直前の数学の岡部先生の最後の授業。

先生曰く「今日の授業は、高校過程を超えるけれど、将来必ず役に立つマクロリン展開の説明をします」と言われました。正直な所、当時は正しく理解できなかったと思いますし、それが将来役に立つとも、とても思えませんでした。ただ、何となく面白い話だなという事で、マクロリン展開という言葉だけは覚えたように記憶しています。

マクロリン展開

$$f(x) = f(0) + f'(0)x + \frac{1}{2!}f''(0)x^2 + \frac{1}{3!}f'''(0)x^3 + \dots$$



数学的

$$I_{ds} \approx I_b + (f/\Delta v_{gs}) * v_{gs} + (f/\Delta v_{ds}) * v_{ds}$$

工学的

$$I_{ds} = g_m * v_{gs} + g_o * v_{ds}$$

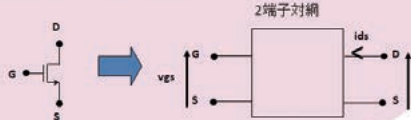


図10. 数学を工学に利用する

社会人となり半導体設計者として自立し始めた頃、山田さんという先輩に出会います。その方から半導体設計の基本としてトランジスタのモデル化を教わりました。モデリングとはトランジスタという素子を抵抗素子だけで表現するもので、そこに登場したのがマクロリン展開でした。何と10年前の最後の授業が蘇ってきました。上の写真は、その2人が顔を合わせた瞬間ですが、壁に掛けた絵画を前にお互いが観察した内容を楽しそうに話しています。また、山田さんからは、知識だけではなく、「観察する事」、「都合の良い結果だけを見て断定しない事」といった仕事の進め方も教わりました。

最近、STEM教育という言葉を目にします。"Science, Technology, Engineering and Mathematics" (科学、技術、工学、数学)の総称です。工学とは“モノ作り”の事で、科学という探求心の元で、技術や数学という道具を利用し、モノづくりをしていきましょうという事です。学校教育に、数学や科学(理科)、技術といった科目はありますが、そこに工学(モノ作り)を加えようという取り組みのようで、エンジニアあがりの著者としてとても嬉しく感じ、モノづくりに長けた子供達が育って欲しいと願っています。

6. 謝辞

本稿執筆にあたり画像掲載の許可と内容の許諾を頂きましたソニー(株)様に感謝いたします。また、執筆中にFeliCaの生みの親、元ソニー(株)情報技術研究所長の伊賀章さんをご逝去されました。謹んでご冥福をお祈りいたします。

著者紹介 中本 泰(なかもと やすし)



1960.02.14生まれ。元ソニー(株)半導体事業本部。主な実績はFeliCa用LSIとCMOSイメージャの開発。現在は、(株)TNPパートナーズにて 保健・医療のパラダイムシフト推進に関わる。
<http://www.geohealthinnovation.jp/>