

社会生活の夢を実現したホール素子の研究開発

A Hall Sensor Research and the Dreams of Japanese People

柴崎一郎

Ichiro Shibasaki

公益財団法人 野口研究所 学術顧問

〒 173-0003 東京都板橋区加賀 1-9-7

03-3961-3255

Email:shibasakii@goo.jp

研究とか開発とか、軽薄短小、薄膜、ナノ、先端技術等、多くの言葉がささやかれて來た。こうした歴史の中で、薄膜ホール素子という磁石の磁界を検出する磁気センサの研究開発が、如何に最近の我々の社会生活に浸透し、支えているか、夢を実現したか、そして、社会を変えたか、如何なるインパクトがあったか、体験を語る。

1. はじめに

新たな時代の訪れは、必ずキーとなる技術がいくつか生まれ、統合されることで実現している。新たに生まれた技術が、如何なる時代の変化とイノベーションと関わったか、如何なる産業へ貢献したか、我々の生活を如何に変えたか、何ゆえに技術が必要であったかを知るのはかなり難しく、そうした視点での技術や研究開発の議論も大切である。

今から 74 年前、日本社会は太平洋戦争という世界史上最大の戦争を経験し、敗戦国として、日常の暮らししが破壊され、社会生活は大きなダメージを受け、食糧も十分ではない状況にあった。戦後のこの厳しい現実下で、当時の日本国民は、過去の反省と共に、復興という合言葉で努力を開始した。目標は、豊かで平和な生活を得たいという夢であり、夢に向かって邁進した。夢があれば、人は頑張れるのである。著者が開発に関わった、近年応用が著しく拡がる高感度薄膜ホール素子技術は、こうした戦後の社会生活の夢の実現にかかわった事例である。次節では、どの様な関わりであったかを語る。

2. 戦後日本人の夢と希望を叶えた高度成長と時代背景

歴史を紐解いてみよう。我々人類は、数ある動物の中で、夢を持てる動物である。更に、人類は、昔から、あれも欲しい、これも欲しいという夢の実現を求める。夢の実現には、科学技術という知恵が必要であった。筆者が多夢時代と位置付けた 19 世紀、20 世紀は、人類社会が多くの夢の実現を求め、世界的な規模で科学や技術が急進歩した時代であった。20 世紀の後半、日本人が抱いた夢を纏めてみた。「豊かな社会の実現」の夢である。日本人全員の総意を調べる訳にはいかないので、私が感じ、また高度成長期を通じて囁かれた

戦後の日本人の夢と思われる項目を下記にリストアップした。これらは、地球上に住む人類の夢とも共通する希望であり、期待する夢でもあった。

1. 十分な食料、美味しい食事
2. 家庭の電化、快適生活
3. 美しい着物、ドレスアップ、海外旅行
4. 十分な収入、高額の賃金、一億総中流
5. 自由な楽しい生活の出来る平和な社会
6. 病からの開放！！

21世紀に入った現在、既に実現している夢もあるが未だ叶わぬ夢もある。世界的な視点で見れば、5、6項は、未だ叶ってはいない夢である。夢の実現は容易ではない。そうした難題への挑戦が、敗戦の荒廃から立ち上がった日本の戦後復興とその後の高度成長である。夢の実現には、新しい技術の創出とそれを実現する科学技術教育が必須であり、科学技術を身に着けた若い研究者、技術者の活躍が必要であった。

1950年代中葉、戦後復興に漸く目途が見えて来た日本の産業界は、大きく舵を切り、高度成長を目指した。そして大量の技術者・研究者のニーズに応えるべく、理工科系の大学の拡充と教育に注力した。筆者は、高度成長経済が本格化する1960年代に大学と大学院に学んだ。今とは違い、経済的な事情もあり、望んでも全員が大学教育を受けられた時代では無かった。また、都会との教育格差もある貧しい時代ではあったが、科学や技術を学ぼうとする若者は沢山おり、それぞれの立場で努力した時代である。

1950年代に入ると、戦後極めて厳しかった食糧事情も徐々に改善され、科学や技術を学び、また、技術者・科学者を志した若者が産業界で活躍する時代が到来した。新幹線を始めとした新規の鉄道網が計画され、自動車の普及、鉄鋼やその他の金属材料や産業資材、工業原料等の大量供給を可能にする化学産業の大きな発展もあった。更に、電気、電子・通信などを基幹とした、豊かな社会と生活の利便性を目指した先端技術開発が注力された。当時を象徴するソニーのトランジスタラジオの開発実用化や夢の一つであったTV放送が始まり、TV、洗濯機、冷蔵庫等の家電製品が家庭に普及し、東京オリンピックの開催もあり、豊かな社会の夢の実現が始まった。1970年代に至り、家庭の電化が進み、ニクソンショック、オイルショックもあったが、電気、電子・情報産業は、自力で半導体技術への注力と共に日本経済を牽引した。この時代の大型商品カラーTVに次いで、家庭用VTRやコンピュータの小型化、パーソナル化、PC開発が注力された、その本格的な成果が1980年代に開花した。そして、同じ物を大量に低コストで造るという日本型の物つくりが成功し、**Made in Japan**が世界に普及した。やれば全て上手く行くと思われた時代である。中央研究所が多くの会社に設立され、「基礎研究と将来の夢」が大いに語られ、奨励、注力された。そしてこの夢多き時代には、現在の電子、情報・インターネット社会を支える重要な技術や技術の芽が数多く生まれ、現在に社会を支える多くのイノベーションが日本人によって生まれた。

振り返れば、戦後の復興期、高度成長のスタートの時代、決して豊かではなかったが、人々は頑張った。そこでは、電気の技術により豊かで楽しい生活の夢、カラーTV、洗濯機、PC、乗用車、美しいドレス、海外旅行、いずれも夢であったが、科学技術を身に着けた技術者、研究者は、企業で、大学で、学会で大いに議論し、夢中で夢を語りあい、そして、夢を実現する懸命な努力をした。そうした中から、高度成長と共に、数々のイノベーションが生まれ、やがて社会を支える大きな技術に育った。真に夢多き時代であった。高度成長もオイルショックによる景気変動もあったが順調と思われた。1980年代には、Japan as No.1との声もあった。しかし、全てが上手く行くわけではなかった。高度成長経済の発展は、環境破壊など解決すべき大きな問題も生じていた。高度成長が永遠に続き、同じ物を大量に造るという日本型物造りは、不滅と思われたが、1990年代初め、20世紀の最終期に襲来したバブル経済の崩壊で、高度成長は破綻、終焉した。国内経済は著しい停滞で長いデフレ経済への突入し、豊かな社会の実現という夢が崩壊した。多くの若者が活躍する夢を奪われた時代の再来であった。21世紀まで続いた、この長い不況のトンネルを抜け、明るい未来と新たな発展を生むには、知恵を絞り、未来を拓く夢を創る議論とイノベーションが大切である。原点に戻って、こうした一つの事例として、戦後日本人（＝日本社会）の夢の実現に向けた私の体験、ホール素子の研究開発と応用の広がりの現状を紹介する。

3. 高感度薄膜ホール素子の開発と応用

3.1 開発の背景

高度成長が軌道に乗ったと思われた1970年代後半、日本の電気、電子メーカーは、次代の大型商品、家庭用VTRやコンピュータの小型化（PC化）の開発に注力していた。開発を狙ったシステムには、テープ走行の精密な制御や回転ヘッドの駆動等の超小型モータによる駆動が必須の部分があった。この為、超小型で、ブラシによる電磁ノイズの発生が無く、更に、精密な回転の角速度制御が可能なモータが必要となった。この様な目的に適合するモータは、永久磁石回転子を備えた直流駆動（DC駆動）ブラシレスモータである。その開発に必要な技術であるが、①強力で保持力の高い永久磁石、②精密な角速度制御用の小型で低コスト制御回路、③回転検出に超小型で高感度の磁気センサ、ホール素子が必要であった。当時、永久磁石は磁石メーカーの研究開発があり、また、制御回路開発は、電機・電子メーカーの社運をかけたLSI開発が期待できた。その一方、当時のホール素子は、磁界計測用プローブであり、感度も低く、手作りで、電子部品として超小型DCブラシレスモータに使えるホール素子ではなかった。更に不都合なことに、当時はSiのLSIやGaAs系の電子素子の研究開発が中心の時代で、ホール素子研究は無く、ホール素子入手は大問題となり、VTRやPC開発の大きな障害となった。

問題を解決したのは、電気・電子系のメーカーの研究ではなかった。オイルショックの後の企業体质転換を迫られていた、全く異業種の旭化成工業（株）（現旭化成株式会社）が手掛け開発した高感度InSb薄膜ホール素子である。このホール素子を使い、VTRやPCの

機械駆動に必須のモータ、ホール素子により回転を検出し、電子制御により、精密に回転速度を可変制御できる超小型 DC ブラシレスモータモータ、通称ホールモータの実用化、量産が可能になった。高度成長の中核を担う VTR や PC の小型化、パーソナル化などを実現する超小型の動力が超小型、高感度 InSb 薄膜ホール素子により生まれた。

3.2 高感度 InSb 薄膜ホール素子の開発

筆者も参加したホール素子の本格研究は、1974 年に始まった。しかし、当時の研究グループは、半導体の専門家は皆無であり、この異分野研究は、至難、曲折を極めた。数々の未経験の課題に、議論に議論を重ね、更に、実験と試作を重ねた。失敗、トラブル、また失敗、という数々の曲折、危機があった。技術とは別の危機もあった。しかし、何れもかろうじて乗り越え、真空蒸着による InSb 薄膜技術、磁界検出の高感度化、量産製造技術の確立、更に、電子部品としての信頼性、耐熱化技術等のユーザの強力な要望を完全にクリヤーした。スタート以来 7 年が経過し、1980 年、延岡に小さな工場がスタートしたが、困難は続いた。しかし、生みの苦しみとも言うべきこうした困難を乗り越えて、最終的に開発した高感度 InSb 薄膜ホール素子の特性は、従来比 20~30 倍（当時）という世界トップの超高感度で、大きなセンサ出力（200~300mV/V0.05T）を有していた。更に、電子部品として、超小型樹脂パッケージで高温自動実装に耐える 260°C の耐熱性を有し、磁気センサとして実用性が極めて高い磁気センサであった。この高感度 InSb 薄膜ホール素子（市販の製品）の写真を、Fig.1 に示した。さらにその特徴を表 1 に示した。



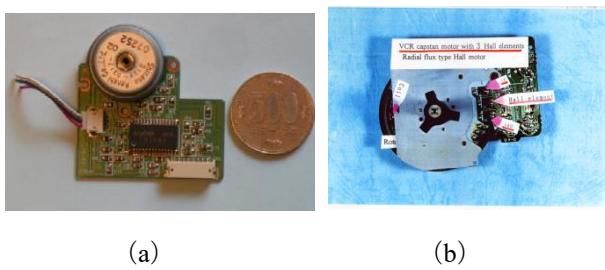
Fig.1 市販の高感度薄膜ホール素子（左下は、パッケージ前の写真）

表 1 高感度 InSb 薄膜ホール素子の特徴

| 特徴 | |
|----|----------------------------------------|
| 1 | 従来の常識を破った高感度ホール素子 (従来比 20~30 倍の高感度) |
| 2 | 超小型で量産性に優れる電子部品 |
| 3 | 強固な樹脂パッケージと高信頼性、耐熱性 |
| 4 | 磁気を利用した非接触センサ |

3.3 高感度 InSb 薄膜ホール素子の応用

この高感度 InSb 薄膜ホール素子の実用性は極めて高く、開発以来、VTR、PC 等の機械駆動用に必須の回転子の角速度を精密に電子制御する超小型ホールモータの回転検出用の磁気センサに多数使われ、その実用化、量産供給を実現した。そして、20 世紀最後の 20 年を代表する VTR、PC 等の開発と実用化、その普及が実現した。今風に言えば社会実装である。こうして、夢の一つ：【家庭の電化、快適生活】の一部、戦後日本人たちが望んだ長年の夢の一部が実現した。工場で大量生産された最新の映像機器や情報機器は、町の電気店に並び、カラーTV と並び、VTR や PC が家庭に普及し、更に、同じ頃に開発された 8mmTV カメラなどで、美しい景色や旅行記録、家庭の記録等が実現し、自分たちが撮影した映像が楽しめる時代が到来した。超小型化したコンピュータ、PC は、多くの人たちが日々使う情報機器として、事務所や家庭に普及し、またインターネットの端末としても広く世界に普及した。勿論、これらの映像、電子情報機器は遠く海外にも輸出され、世界中の人達がその恩恵を受けることとなった。高感度 InSb 薄膜ホール素子は、将に社会生活を支える磁気センサとなった。Fig.2 には、高感度 InSb 薄膜ホール素子が使われるホールモータの例で、(a) は PC 用の CD-ROM 駆動モータ、(b) は、VTR のキャプスタンモータである。この他、VTR では回転ヘッドモーターや VTR カメラなどにもホールモータは多数使われた。



(a)

(b)

Fig. 2 (a) CD-ROM 駆動のモータ、(b) VTR のテープ駆動用のキャプスタンモータ

高感度 InSb 薄膜ホール素子開発により、全く新たな回転を電子制御するモータ技術が生まれた。モータ技術の新たな歴史を拓いたイノベーションであった。この新たな電子制御モータの技術は、電機・電子産業の発展と高度成長を強力にサポートした。どの家にも、家電製品が溢れ、大きな産業へのインパクトであった。この様な産業の高度成長は、働く人たちの収入アップにつながり、工場で働く人たちは勿論、多くの人たちがその恩恵を受けた。そして、日々美味しい食事を楽しみ、ドレスアップなど、消費生活も豊かになった。更に、国内は勿論、海外旅行も日常化した。戦後日本人の夢：

1. 十分な食料、美味しい食事、2. 家庭の電化、快適生活、3. 美しい着物、ドレスアップ、海外旅行、4. 十分な収入、高額の賃金、一億総中流。

等を実現する一助となる大きなインパクトであった。研究開発が産業の高度成長をサポートし、人類の夢を実現し、豊かな生活の招来に貢献した事例である。残念ながら、世界的

に見れば、戦争は依然として無くならず、平和な社会の実現は未だ遠い。癌などの病からの解放も未達であり、夢が全て実現した訳ではない。これからの課題である。

3.4 更なる研究の発展

更なる研究開発の進展もある。その一つは、センサと Si の集積回路 (IC) 増幅器を組み合わせ新たな機能を創出した磁気センサ、ハイブリッドホール IC である。磁界の検出—非検出に対応して、増幅された ON-OFF 信号が得られる磁気センサである。更に、磁界比例の増幅出力が得られるリニア—ハイブリッドホール IC も開発されている。ハイブリッドホール IC は、磁気センサとして、非接触スイッチ、非接触センサとしてホール素子応用を大きく拡げている。Fig.3 はハイブリッドホール IC の写真、(a) は市販の樹脂パッケージ製品、(b) は Si 集積回路 (IC) 増幅器と高感度 InSb 膜ホール素子がワイヤー接続された写真である。

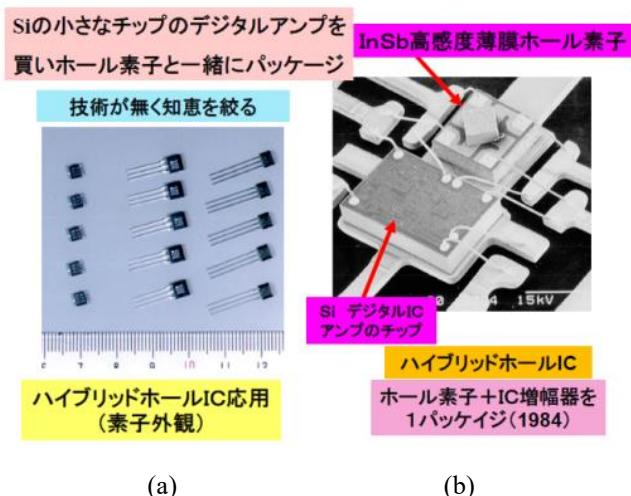


Fig.3 ホール素子とSi集積回路 (IC) の増幅器を組み合わせたハイブリッドホールIC、(a) 樹脂パッケージ製品、(b) Si集積回路チップと高感度InSb膜ホール素子がワイヤー接続された写真

更に、新たな薄膜技術によるInAsホール素子も開発されている。Fig.4 (a) は筆者らが1982年に開発、導入の一原子層ずつの積層によりInAs単結晶薄膜や量子井戸を大面積 (マルチウェーハ) で量産製作をする分子線エピタキシー (MBE) 装置である。このMBE装置により、世界で初めて電子移動度の大きいInAs単結晶薄膜やInAs量子井戸の量産が可能になり、厚さ $0.5 \mu m$ のSiをドープしたInAs単結晶薄膜ホール素子、厚さ50nm ($0.05 \mu m$) の動作層のInAs量子井戸ホール素子が開発、実用化された。ナノテクホール素子である。各種の非接触センサ、非接触スイッチ、車載センサ、非接触電流センサ等に広く使われている。



Fig.4 単結晶や量子井戸を製作する分子線エピタキシー (MBE) 装置写真
(左下写真は、製作した厚さ0.5μmのInAs単結晶薄膜)

4. 高感度薄膜ホール素子の省電力応用と社会生活の夢の実現

Fig.5 の①～⑥に示したのは、高感度薄膜ホール素子を使う PC や VTR カメラ、自動車等、戦後日本人が描いた豊かな社会生活の夢を叶えた良く知られた製品の例である。



Fig.5 身の回りで使われる高感度薄膜ホール素子の応用例

夢の実現だけではない。快適な社会生活と地球環境を守る省電力化にも高感度薄膜ホール素子は貢献している。ホールモータは、回転子の電力消費や角速度制御によりブレーキロスの無い、本質的な省エネルギーモータである。国内の総発電量の 50%以上は、動力モータが消費している。モータの省電力による発電所の CO₂ 排出や放射性廃棄物の削減は、環境負荷低減上極めて重要である。この為、家電製品やエアコン等の駆動モータのホールモータ化やインバータ駆動による省電力化が急速に進んでいる。特に、動力モータの省電力駆動に広く使われるインバータには、ホール素子を使う非接触電流センサが必須である。

5. 高感度薄膜ホール素子と21世紀の夢

高感度薄膜ホール素子の応用は、最大のモータ応用の他、電力分野の計測でも必須の非接触電流センサ、更に、非接触スイッチ、非接触センサ、普通車は勿論、HV、EV等の車載センサ等にも多数使われる。Fig.6には、高感度薄膜ホール素子の応用の年次推移の一部を示した。開発以来現在まで、累積で350億個を超えて使われている。1997年以来、毎年10億個を超えて使われており、2017年には史上最高の16億個が使われた。

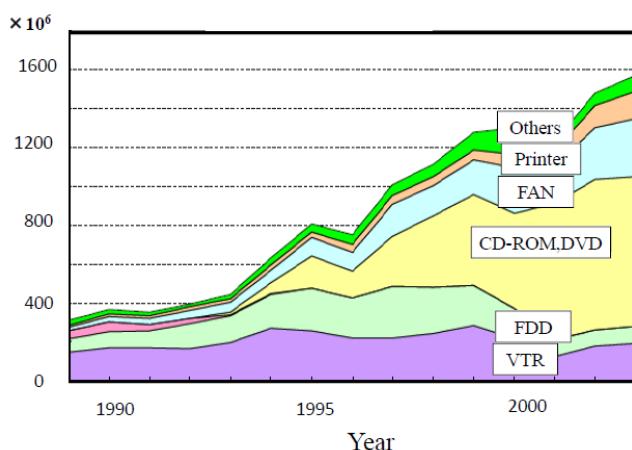


Fig.6 経済を支えた高感度薄膜ホール素子の応用の分野別年次推移

高感度InSb薄膜ホール素子は、VTRやPC等の発展や時代を象徴する映像、電子情報産業やインターネット社会の実現に大きく貢献し、豊かな社会生活を支援する。こうした社会貢献により、2014年、電気学会第7回「でんきの礎」顕彰では、「電子制御モータを生んだ高感度InSb薄膜ホール素子」として顕彰された。社会生活の夢を実現する研究開発の夢がかなった瞬間であった。

更に、薄膜ホール素子研究は、未来への指針と夢を示した。21世紀は、IoT、AI時代である。ホールモータは、①磁力を生むコイルと回転系の機械構造から成る（従来の）モータに、②回転を検出する磁気センサ（耳目に相当）が付けられ、その信号により、③どの様にモータを回転させるかを指示する制御回路=頭脳（モータ駆動回路）を備えたモータであり、明らかに、AIモータの原型である。将来、④学習能力、⑤考対力を備えれば、AIモータとなる。磁気センサやホールモータの先にAI動力の夢が見える。

工学研究は、実用化し、社会で役立てるのが目標である。高感度薄膜ホール素子開発は、強力な志と粘りで、困難を乗り越え実用化する迄頑張ることが必要であった。夢はさらに拡げることが大切である。研究開発で得たキーワードは、

- ①先輩がやらなかつたこともやる、
- ②学会の話題にない事にもイノベーションのシーズがある、
- ③やれば出来る。やらなければ出来ない。

研究開発は、成功も失敗も挫折もある。困難は知恵を絞り乗り越えればよい。夢を決して忘れない事である。科学や技術は常に味方である。科学が足りなければ自ら創る。

科学を創り、科学を応用（創理応用）が大切である。科学を大切にした研究が成功に道を拓く。失敗は成功の基と言うが、失敗に学ぶ（科学を見つける）ことが成功の基になる。

謝辞

1. この様な機会を用意して頂いた、TMS 研究会の皆様には心より感謝申し上げます。
2. 高感度薄膜ホール素子は、旭化成(株)の研究開発で生まれた。当時の多くの先輩、同僚、後輩の皆さんの支援と活躍に心より感謝する次第である。
3. 本研究の一部は、JSPS 科研費 (課題番号 15K06000)の助成を受けたものである。