

## 最終講義

## 高周波磁気応用を拓く

Pioneering High Frequency  
Soft Magnetic Applications

山口 正洋\*

Masahiro YAMAGUCHI



○司会 時間になりましたので、山口正洋教授の最終講義を始めたいと思います。

私は司会進行を務めます電気エネルギーシステム専攻長の斎藤と申します。よろしくお願ひします。

最終講義を始めるに当たりまして、初めに、山口先生のご略歴を簡単にご紹介させていただきます。

山口正洋先生は、昭和31年10月に静岡県清水市にお生まれになりました。静岡県立清水東高等学校をご卒業された後、昭和50年4月に東北大学工学部電気工学科に入学され、昭和54年3月に卒業されております。その後、直ちに大学院に進学され、昭和59年3月に東北大学大学院工学研究科電気及び通信工学専攻博士課程を修了され、工学博士の学位を授与されております。その後、直ちに昭和59年4月に東北大学工学部電気工学科助手に採用されまして、その後、東北大学電気通信研究所の助手、電気通信研究所助教授を経まして、平成15年4月に東北大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻教授に昇任されております。なお平成25年4月から、電気・通信工学専攻の再編により、現在の電気エネルギーシステム専攻になっております。

また、山口先生は平成22年8月から、東北大学未来科学技術共同研究センター教授も兼任されております。

山口先生は一貫して電磁材料の高周波利用技術や磁気デバイスの集積化、高機能化等の学術

分野において世界を牽引されてきました。特に、超高周波帯での磁性材料や、電磁材料を用いたマイクロ磁気デバイス、高周波電磁計測、環境電磁工学、マイクロ波工学等において数多くの世界的研究業績を上げられました。

また、IEEE Magnetics Society President、IEEE Distinguished Lecturerなどをご歴任され、International Magnetics Conference「INTERMAG 2023」での仙台誘致の招致委員長、それから日本磁気学会理事、電気学会マグネティクス技術委員会委員長などを歴任されております。長年にわたって指導的な立場で学会運営等の重責を担われ、この分野の活性化に尽力されてきております。

また、山口先生は産業分野へも多大なご貢献をされておられて、ご自身の研究成果の実用化はもとより、国際標準規格化においても多くの成果を上げられております。その功績が認められて、国際電気標準会議 (IEC) から「IEC1906賞」という工業製品の標準化推進活動に優れた功績者の方を表彰する賞を受賞されております。

このように多くの業績を上げられた山口先生の講義は大変楽しみにしております。

では、早速、山口先生の講義をお伺いしたいと思います。

先生どうぞよろしくお願ひします。

\* 東北大学名誉教授

東北大学未来科学技術共同研究センター 特任教授 (研究)

文部科学省技術参与 (環境エネルギー科学技術研究担当)

### 1. はじめに

齋藤先生、過分なご紹介ありがとうございます。

私にとって高周波磁気応用が未開のエキサイティングな分野でした。何かを拓けたかもしれないし、拓けずに挫折もしました。今日の講義の要点は、なぜ挫折したか、そして挫折の中から何を次にしたかヤングプロフェッショナルの皆さん方にお伝えしたいことです。その思いで昔話をいたします。

図1に、私が携わることができた高周波のテーマを「高周波化の履歴書」というタイトルで書いてみました。

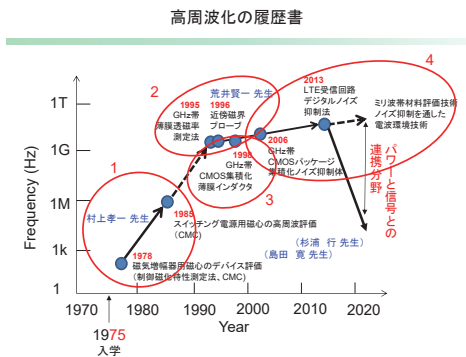


図1 高周波化の履歴書

1975 (昭和50)年に東北大学に入学し、村上研究室に配属されたのが1978年でした。これから約10年間で、商用周波数から1MHzまで、少しづつ研究対象の周波数範囲が上がりました。

それから数年すると、一気にギガヘルツに飛びました。ここに面白いことがいっぱいありまして、そこで研究してまいりました。最近では、低い周波数と高い周波数をやぶらみ状態で研究しています。人間は大体定年の頃になると、学生の頃にやり残したこととか、あの頃を懐かしんでまた始めたりするというのがあると思うんですが、私も同じです。

私が研究分野に足を踏み入れたのは、学部のとときの指導教官、村上孝一先生のお導きによるところが非常に大きいです。私が大学で定年を迎えるような人生を歩むとは、この頃は全く思っていませんでした。

その後、通研の荒井賢一先生から、「山口君おいでよ、マイクロ磁気デバイスをやろうよ」と誘っていただいたことが、ギガヘルツ帯で研究を展開

する一番のきっかけになりました。

その後、2003年には自分の研究室を持たせていただき、島田 寛先生と杉浦 行先生にはいろんな形でずっとお世話になり続けていたというのが履歴書であります。

今日は、その中から高周波と、そして磁気応用を拓くとか拓き損なったという観点から、4つの話題を用意しましたので、順にお話ししたいと思います。

#### 軟磁性材料開発の歴史

| Year | Inventor                                    | Country     | Material   |
|------|---|-------------|--|
| 1900 | Barret, Brown, Hadfield                     | UK          | Si steel plate (Fe-1.5 to 2.5%Si)                          |
| 1923 | Arnold, Elemen                              | USA         | Permalloy (Fe-Ni)  |
| 1926 | Honda, Kaya                                 | Japan       | Measurement and discovery of magnetocrystalline anisotropy |
| 1929 | Elcenen                                     | USA         | Pemendur (Fe-50%Co)  |
| 1932 | Kato, Takei                                 | Japan       | Cu-Zn ferrite  |
| 1932 | Masumoto (Hikaru), Yamamoto                 | Japan       | Sendust (Fe-Si-Al)   |
| 1934 | Goss  | USA         | Oriented Si steel plate                                    |
| 1947 | Boothby, Bezorth                            | USA         | Supermalloy (Fe-Ni-Mo)                                     |
| 1947 | Snock                                       | Netherlands | Mn-Zn ferrite, etc.  |
| 1972 | Takahashi (Minoru), Kim                     | Japan       | Fe <sub>2</sub> N <sub>2</sub>                             |
| 1974 | Fujimori, Masumoto (Tsuyoshi), Ohi, Kikuchi | Japan       | Amorphous soft magnetic properties                         |
| 1975 | Egami, Flanders, Graham                     | USA         | Amorphous soft magnetic properties                         |
| 1988 | Yoshizawa, Oguno, Yamauchi                  | Japan       | Noncrystalline soft magnetic materials (Fe-Si-B-Cu-Nb)     |

Satachi Sugimoto, "History of the Development of Soft Magnetic Materials," Magnetic Material for Motor Drive Systems, Ed. Keisuke Fujisaki, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019. Partly edited by speaker.

図2 軟磁性材料開発の歴史

### 2. アモルファス磁心の高周波応用

1番は、学生時代の話です。1970年代は、磁性の分野ではアモルファス磁性材料の時代でした。電磁石やリアクトルに使う磁性体は、歴史的に軟鉄が代表でしたので、軟磁性材料と呼ばれます。その多くは20世紀の前半に発明され、今日まで使われています。それから数10年後にあたる1970年代に新材料が出現したことは特筆されることです。図2で背景色をつけたのは東北大学からの発明で、この分野で多大な貢献があります。

1974年に東北大学金属材料研究所の藤森啓安先生、増本健先生らによってアモルファス材料が軟磁性を有することが発見されました。アモルファス材料は電気抵抗率が高いため、高周波応用のボトルネックとなっている渦電流損失が小さく、磁性体の高周波応用の進展が大きく期待される材料でした。

村上先生は、アモルファスは高周波で使えるとみんな思っているけれど、実際に試した例はあまりないので、応用先を具体化して高周波磁気増幅器としての可能性を調べようと提案されました。磁気増幅器とは、磁気飽和と未飽和の2つの状態を回路スイッチのオンとオフに対応させる機能素子で、現在のパワーエレクトロニクス用半導体素

子と同様にオン／オフ動作によりPWM制御を行うことができます。アモルファス薄帯を巻いてトロイダル磁心に整形し、負荷巻線と制御巻線を巻いて回路に接続します。外見は変圧器と同じですが、磁気飽和を含む磁心動作が異なります。

アモルファス磁心は電力制御素子に使える性能を持つか？

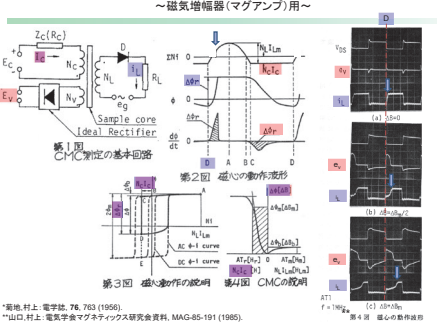


図3 制御磁化特性の説明と動作波形

図3は複雑ですが、まず左上は半波整流回路を基本とした測定回路を表しています。中央上には起磁力、磁束 $\phi$ と、磁束 $\phi$ に対応した磁心の誘起電圧  $d\phi/dt$  を図示しました。起磁力は電流と巻線の回数から得られ、誘起電圧は検出巻線  $N_v$  の端子電圧に等しく、磁束 $\phi$ はこの誘起電圧を時間積分して得られます。制御巻線  $N_c$  に直流の制御電流  $I_c$  を流すと、矢印を付した時点で、負荷巻線  $N_L$  に負荷電流  $i_L$  が流れはじめます。これを点弧と呼び、このタイミングで磁束 $\phi$ が飽和します。このように、磁気増幅器とは制御電流  $I_c$  によって点弧のタイミングを制御する素子といえます。

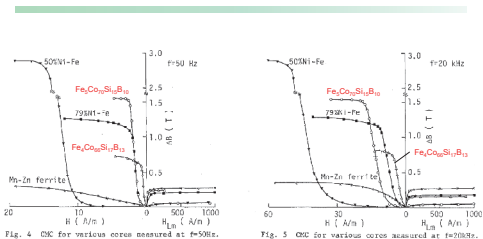
電源電圧の極性が負となる半サイクルでは、ダイオードが逆バイアスされますから負荷回路はオフとなります。この間に、制御電流  $I_c$  によって、磁束 $\phi$ のレベルが飽和(点B)から  $\Delta\phi_r$  だけ下がります(点C)。その磁心動作を左下図に示しました。 $\Delta\phi_r$ の大きさや時間変化は、回路方式とともに磁化ダイナミクスによって決定されますので、磁心の良さを制御電流  $I_c$  と磁束レベル  $\Delta\phi_r$  との関係により表現できます。

次に電源電圧の極性が正に反転すると半波整流回路がオンとなり、磁心の磁束レベルが上昇します。そして電源電圧の時間積分値 ( $d\phi/dt$  の図中で斜線の面積)が  $\Delta\phi_r$  に等しくなるタイミングで磁心が飽和し、負荷回路が点弧します。このため、磁心の良さは、小さな制御電流で負荷電流を大きく変化させるような回路性能、すなわち増幅度も表しています。

負荷電流は磁界強度  $H$  に換算でき、また磁束レベルを磁心断面積  $S$  で割れば磁束密度レベル  $\Delta B_r = \Delta\phi_r/S$  に換算できます。磁性体の良さを評価する場合には、磁界  $H$  と磁束密度  $\Delta B_r$  との関係を中心下図のように表示してパラメータを読み出します。右端図の波形写真は、負荷回路の電源電圧波形を方形波とした場合の動作例で、 $\Delta B$ の大きさによって負荷電流  $i_L$  が変化する様子を表しています。測定法とパラメータの読み出し手法は村上先生が体系化され、制御磁化特性 (Control Magnetization Curve, CMC) という名称で知られていました。

私は、高周波励磁回路と検出方式を工夫して、CMCによりアモルファス磁心を評価しました。従来、磁束レベル  $\Delta\phi_r$  の読出しには誘起電圧  $d\phi/dt$  を機械的接点の開閉により整流して平均値指示電圧計で計測していたところ、高周波で計測するためにオペアンプによる理想整流器へ電子化し、さらにデジタルオシロによる数値積分へと変化させました。ちょうどアナログからデジタルへ推移した時代でした。また、高周波電力増幅器の電流・電圧定格を基準に、交流保磁力以上に相当する負荷電流を確保しつつ、磁心の飽和電圧を印加できるように磁心寸法と巻線回数を設計しました。負荷電流の確保には巻線の回数を多く、飽和電圧の確保には巻線の回数を少なくしたいので、試験用磁心に対して所期の電流と電圧を同時に確保するのは難しく、しばしば磁心寸法を変えて試料試作からやり直す必要に迫られました。これは東北金属工業(現、トーキン)のご協力で実現できました。

20 kHzでは、利点がある



M. Yamaguchi, K. Murakami, IEEE T-MAG 18, 1403 (1982).

図4 各種軟磁性薄帯磁心の高周波制御磁化特性 (20kHz)

はじめの目標は、20kHzまでCMCを評価することでした。1980年当時、スイッチング電源を製品化するためには、可聴周波数を超えて20kHzで動作する実用的スイッチング回路の開発が要点

でした。

図4に朱書きしたコバルト系アモルファスを、従来からの軟磁性体の代表としてパーマロイ(ニッケル鉄合金)と比較しました。軟磁性パーマロイはニッケル組成比によって大きく2つに分かれ、飽和磁束密度が1.5Tと大きいニッケル50wt%パーマロイと、飽和磁束密度は約0.7Tに留まるものの、50Hz動作では保磁力が小さい利点があるニッケル79 wt%パーマロイです。制御磁化特性で評価すると、コバルト系アモルファスでは横軸の制御入力(電圧)が格段に小さくて済む組成がいくつかあり、とくにCo66wt%組成(Fe<sub>4</sub>Co<sub>66</sub>Si<sub>17</sub>B<sub>13</sub>)では、20kHzまでその良さが保たれていることが分かりました。

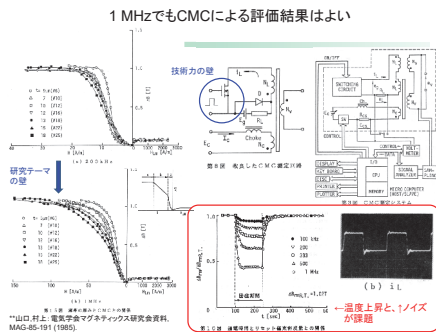


図5 各種軟磁性薄帯磁心の高周波制御磁化特性 (1MHz)

こうなるとさらに周波数の高い領域での特性に興味湧きます。アモルファスは比抵抗が高いと申し上げましたが、合金で導電性がありますから、周波数が高くなれば渦電流損失が顕在化し、発熱により使えなくなることは当然予見されました。

それで、図5にある7μmから18μmまでの薄いアモルファス薄帯のラインナップを、当時、村上研究室で共同研究しておりましたトーキンの方々で作って頂きました。それと測ると、200kHzまで周波数を上げて、特性は厚みによってあまり変わりません。

それではMHzまで上げてみようとして装置やソフトウェアを改良しますと、面白いことに、板厚が厚いと制御磁化力を増やしても磁束密度レベルはずっと直線的には立ち上がらずに、傾きが小さくなるような領域が現れました。板厚が薄いとずっと直線的に立ち上がりました。当時、パーマロイや電磁鋼板のように短冊状磁区構造を持つ合金磁性薄帯なら、その磁化反転モデルは板厚によって異なり、板厚が薄いと薄帯の表面から発生する逆磁区がすぐに裏面に到達しあとは面内方向に広が

る一方で、板厚が厚いと逆磁区が薄帯の裏面に到達するよりも前に表面で隣接する磁区と繋がって大きな1つの磁区となって大きなダンピングを生じ、磁化反転の途中から磁化反転速度が低下すると言われていました。これは電気的な様々な測定から予測されたモデルで、当時は観測手段がありませんでした。コバルト系アモルファス薄帯も静的には短冊状磁区構造を持つことは知られていましたので、同じようなメカニズムがアモルファス薄帯にもあり、それがMHzで顕在化するのだろうと、思ったままで終わりました。

この200kHzから1MHzに動作周波数を上げるための研究には、高い壁がありました。1つは図の左側に書いた研究テーマの壁でした。私の学位論文は200kHzで終わって、村上先生からは「もう学位を取ったからほかのことをやりなさい」と言われていました。何をやっていいか分からなくて、実は3年間、私は学術論文が1本もありませんでした。助手にして頂いたのですが科研費の奨励研究も全然通りません。工学部の新任助手で落ち続けているのは自分だけだと肌身にしみて分かる厳しい3年間でした。

その間、国内企業からは1MHzで、海外からは30MHzという驚くべき高周波でアモルファス磁心を用いてスイッチング電源を動作させたという論文が出版されました。しかし磁心そのものの高周波特性は調べられていません。これは研究する価値があると思い、ある日ある時、思い切って先生に相談したら、「やってもいいけど、論文を書きたまえ」と、この一言でありました。

お墨つきが得られたので、その日から、最高1MHzのスイッチング回路を作ることが至上命題になりました。雑誌トランジスタ技術などの実用書を参考にして相当試したのですが、駄目でした。技術力の壁がありました。

そのとき、電設機器工業(株)技師長の平松利平さんに助けて頂きました。平松さんとの出会いは博士課程学生時代に遡り、IEEEのINTERMAGという我々の技術分野では最も権威ある国際会議に参加したときでした。会議はカナダのモントリオールで開催され、私ははじめて国外へ行きました。平松さんはアモルファス磁心を磁気増幅器として使い、1MHzでスイッチング電源を動作させた発表をされました。非常に興味があり、宿泊されたホテルの部屋までお邪魔して、詳しいお話を伺いました。それを思い出して、3年後にいきなり電話をかけまして、「実はあれを

やりたいんですけど、装置を作ってもらえませんか」と相談したら、「山口さん、分かりました。ただ、作るとお金が掛かりますから1週間ぐらいうちの会社に遊びに来ませんか。部品はありますから、そこで自分で組み立てればいいですよ。教えてあげますから」と即答を頂きました。望外の喜びでした。

それで村上先生に、かくかくしかじかで「会社に1週間寄ってきたいんですが」と言うと、「じゃ僕は旅費を出せばいいのか」というこれも想定外のお返事でした。私は1週間の休みを下さいと言うつもりでした。このお二方のお陰で1MHzのスイッチング回路ができ、その結果が先ほどご説明した図5のなかで左下の図になりました。

1MHzまで制御磁化特性を測定できたこと自体はよかったのですが、より大きな壁に当たりました。この回路を動作させると、磁心の発熱によって僅か一、二分で磁束密度が初期値の半分に低下して回路動作が大きく変わりました。これを図5の右下図の太枠内で、左側の波形に示しました。これでは使えません。もう一つ壁があり、太枠内の右側では、スイッチングノイズで悩まされた事例を示しています。この実験では試行回数を多くして再現性を確認して、図中左下のデータを出しました。ここで終わりでした。

つまり、高周波で磁性体が本当に使えるためには、温度上昇とノイズの問題を解決しないことには、どんなに材料自体の特性がよくても使えないと、つくづく思いました。それらに対応するためのコストやスペースとのバランスによって動作周波数が決まることを、身をもって体験しました。これがパート1の結論であり教訓でもありました。

以来、今日に至るまで、私自身は薄帯を使った電力用高周波磁心の研究には深入りしていません。一方、産業界では磁気増幅器は絶縁型多出力スイッチング電源の制御素子としてすっかり定着しています。図6上のように絶縁用変圧器の2次側だけで出力制御でき、部品点数も少なく済みます。周波数は100kHzを超えて小型であり、今後も使用され続けると思われます。

現在も磁気増幅器が使用されている事例として、図6下の写真のとおり、タップ間電圧制御に磁気増幅器を使った交流電気機関車を紹介します。東北と九州で若干数が稼働しています。磁気増幅器の役割は、現在のパワーエレクトロニクスにおけるPWM制御です。日本の交流電気機関

車開発史における特徴的な電力制御方式として、水銀整流器の時代とサイリスタの時代との間に、磁気増幅器の時代がありました。1960～1970年代のことです。ちなみに、IEEEではMagnetics Societyの初代会長、H. F. Stormは磁気増幅器の専門家でした。また、2011年の東日本大震災のとき、常磐線で津波に耐えた機関車がありました。あの機関車も磁気増幅器式でした。

4つの話のうちの第1部はこれで終わりです。

2020年代 現役の磁気増幅器

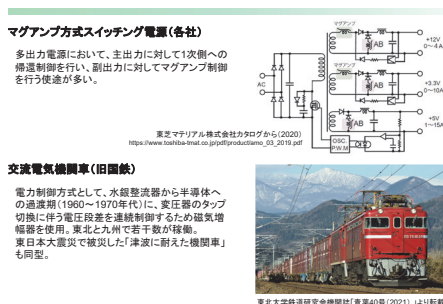


図6 2020年代現役の磁気増幅器

### 3. マイクロ磁気デバイス実現のための高周波薄膜透磁率測定法の開発

第2部に進みます。これはマイクロ磁気デバイス研究の基盤となった多層平面シールドループコイルの研究です。まず背景ですが、第1部の壁に突き当たる数年前から、大阪大学の白江公輔先生のグループが起点になって、平面コイルや平面型磁心の研究がはじまっていた。白江先生は、巻線を例えば2,000回巻くと、1,900回あたりで巻線がぶつんと切れて一からやり直しになるからもう手巻きは嫌だというソフトな言い方で新しい分野を提案されました。それがマイクロ磁気デバイスという新分野になりました。最初はプリント基板の上にアモルファス薄帯を貼りつけた構造からはじまり、数年後に辻本浩章先生が加わって、磁性薄膜インダクタ・トランスの本格的研究が一気に広がりました。回路素子として利用するためには従来にないGHz帯の高周波で動作するインダクタが基本素子で、近い将来、半導体と集積化するという方向性も魅力的でした。出口の方向性はマイクロ電源と集積化センサでした。そのために高周波軟磁性薄膜材料を開発し、様々な磁性薄膜インダクタが試作され、基礎データが蓄積されました。磁気記録分野の薄膜ヘッドと、MEMS製作プロセスをお手本に、日本は世界に先駆けて

マイクロ磁気デバイス(軟磁性膜の受動素子・センサ応用)



図7 マイクロ磁気デバイスをまとめた最初の書物：白江、荒井、島田編、マイクロ磁気デバイスのすべて、工業調査会(1992)

集積化受動回路素子としての磁性薄膜デバイスの分野を拓いてゆきました。仙台でも、増本 健先生、藤森啓安先生、それから村上孝一先生などが中心になられて、アモルファス電子デバイス研究所というマイクロ磁気デバイス専門の研究組織が動き始めました。私は1988年に荒井賢一先生から研究室に呼んでいただき、この分野にのめり込みました。図7に初期の書籍を示しておきます。

当時、荒井研究室では薄膜研究を立上げ中で、公称30MHz までの薄膜透磁率計を使っていました。これをデバイスへ展開する計画でした。ところが、製膜条件をどんなに改良しても10MHz を超すと透磁率が下がってしまい、壁に当たっていました。調べてみると、原因は透磁率測定装置の自己共振であって、材料特性ではないと思われました。それを確かめるため、自ら高周波透磁率測定装置を開発することが最初の大きなテーマになりました。世に装置開発の論文はありましたが製品は無く、GHz 帯の測定報告もほとんど無かったのです。

磁性体の透磁率は図8に示したように複素数で表示されます。学部授業で習う透磁率とは青い線で示した実部で、周波数を上げるとがくんと落ちてしまいます。その周波数が共鳴周波数で、使用周波数の限界です。高周波透磁率測定装置を創るなら、この共鳴周波数以上まで測ろうという動機がありました。その周波数は、多くの合金軟磁性薄膜で、GHz 帯にあります。とはいえ、研究室では桁違いに低い10MHz が壁でした。そのときに荒井先生が「3GHz まで透磁率を測りたいね」と提案されました。現状と二桁もの差があったので、私を含めて研究室では誰も理解できない提案でした。この続きは次々段落の最後に述べることにして、透磁率の説明を続けます。

図8では、帯域を3種類に分けています。共鳴周波数以下では実部が大きく、虚部で表される損失が小さいのでインダクタやトランスに適します。共鳴周波数近傍では損失が大きいため電磁ノイズを熱に変えて抑制できます。これは磁性扁平微粒子によるノイズ抑制シートが日本から世界に広がっていたので、薄膜ではその半導体集積化応用が期待できました。さらに共鳴周波数帯を超えた領域でも表皮効果抑制などの新しい用途があると考えますが、省略します。

さて1993～1994年に利用者による携帯端末の所有が可能になると、電話利用の常識が一変し、一家に1台の固定端末から、個人が移動端末を持つ時代になりました。世界規模の普及により生活様式の変革と、巨大市場の創出が確実視されました。多くの研究者が無線通信技術の新展開への貢献を考える時代のはじまりです。そのキャリア周波数は800～900MHz 帯からはじまり、次いで2GHz 帯が普及しました。マイクロ磁気デバイスの研究者としては、送受信用 RFIC や電源チップへの実装を念頭に、半導体へ磁性体を受動素子や

高周波透磁率 — 磁気共鳴の壁

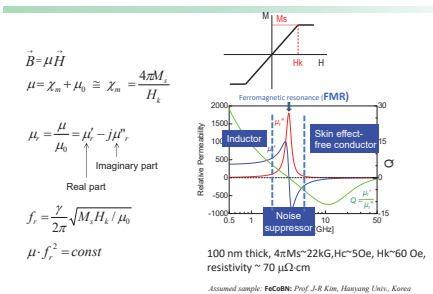


図8 磁性体の高周波透磁率(一軸磁気異方性薄膜を面内の磁化困難軸方向に励磁した場合)

シールドループコイル型薄膜透磁率測定装置

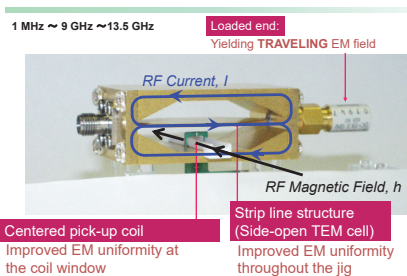


図9 シールドループコイル型薄膜透磁率測定装置

M. Yamaguchi, Yasunori Miyazawa, Katsuji Kamimshi, Ken-ichi Anai, Trans. Magnetic Society of Japan, 3(2003), 137-140  
 A New MHz-to-GHz Thin-Film Permeameter Using a Side-Open TEM Cell and a Planar Shielded-Loop Coil.

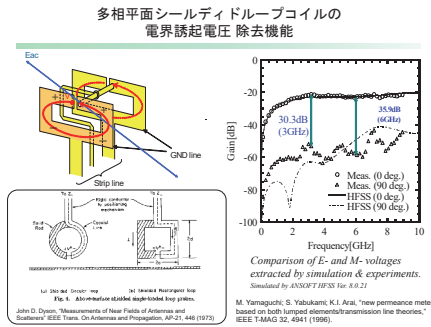


図10 多相平面シールドループコイルの電界誘起電圧除去機能

センサとして集積化したいラブコイルを送りました。一方、半導体分野からは「磁性体？何それ」、「磁性体？それは電源素子であってRF回路用ではないよね」、「ギガヘルツ？その高周波で使える磁性体は無いよね」という問いがあり、それらに根拠を持って応える必要がありました。それには高周波透磁率の定量的な評価結果を示せば十分です。荒井先生の卓見に恐れ入りました。

結果として、図9に示したように、測定周波数9 GHzまで（最近では13.5GHz）に及ぶシールドループコイル型薄膜透磁率測定装置を開発できました。原理は簡単で、まず電流が中央の線から上下のグラウンド面に流れて1ターンコイルを作ります。上と下の両方にコイルを置くことにより電気的な平衡性を良くします。磁界の向きは黒線のようにコイル面に垂直ですので、ここに試料を置き、試料の周囲に1回の検出コイルを巻いてその誘起電圧から透磁率を算出します。

高周波計測器としての要点は、装置各部の特性インピーダンスを徹底して50Ωに整合させることと、新しい検出コイルの開発です。検出コイルの構造を図10に示しました。基本はワンターンコイルなのですが、導体が3層あり、グラウンドシグナルグラウンド構造になっています。この構造にたどり着くまで数年掛かりました。発想は自己共振のないコイルへの挑戦で、コイル自体をインピーダンス整合させることをいろいろ試しました。その最終形がこれです。実際に研究されたのは、今日もいらっしやる数上信先生です。

図10左下に引用したように、この構造はシールドループと呼ばれ、電磁ノイズやEMCの分野では1970年代から高周波コイルとしてよく知られていました。ただしこの図は、同軸ケーブルを曲げて作るという説明図です。それを平面構造に

見立てると、多層平面シールドループコイルになります。これは当時、何でも平面構造にしてマイクロ磁気デバイスにしてやろうという気概に溢れていた研究室ならではの発想だと思います。平面化することで、手作業で同軸ケーブルを曲げるのとは異なり、プリント基板や薄膜プロセスによって小型で寸法精度の高い高周波コイルが実現できます。構造や形状の自由度も格段と広がり、シールドループ以外の構造も可能です。

シールドループの大事な特徴は、電界による誘起電圧を除去できることです。図10右に示したように、計算でも実験でも約30dB除去できます。したがって、電界と磁界が混在する場の中から磁気信号だけをうまく抽出できるので、透磁率測定にとって有用な構造です。しかも、平衡-不平衡変換をこの3層の構造の中でごく自然に行えるという特徴もあります。これらは同軸ケーブル構造では既知で、我々はプリント基板や薄膜による多層平面構造としても、GHz帯まで特長を保持できることを示しました。

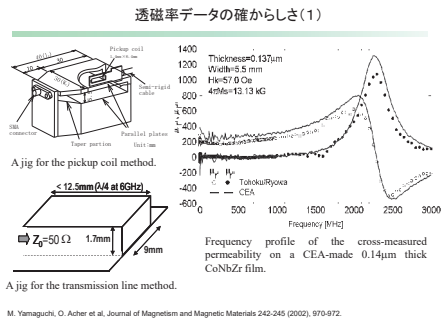


図11 透磁率データの確からしさ（1）

確か MMM1998（開催地マイアミ）のポスターセッションで、図11左上のような3GHzまでのシールドループコイル型透磁率測定装置のノイズ解析を発表しました。隣合わせになった発表者から「比べてみない？」と提案がありました。それは図11左下の終端短絡型マイクロストリップ線路の終端部に薄膜試料を置く形態の高周波透磁率計の発表で、「これはいいぞ」と主張していました。僕ももちろん「うちのいいぞ」と結論付けていました。彼はとてもいい人で、「最初はきつとうまくいかないと思うけど、何かきつと面白いことが出てくるよ」というので、「そうだね、じゃやろう」と意気投合し、同一の薄膜試料で回送試験を行うことになりました。彼は、フランス CEA/Le Ripault の Olivier Acher 氏で、マイクロ波測

定標準に関してフランスでは責任ある立場にありました。

いざ測定してみると、初めは本当に合わなくて真っ青になりました。共同開発した凌和電子と一緒にいろいろ調べた結果、測定開始の直前に試料を一旦磁気飽和させ、それ以降は、とくに直流磁界の印加手順を定めて透磁率を測ると、図11右くらいには2種類の透磁率計の測定結果が一致することが分かりました。Olivierも私も胸を撫でおろし、成果を論文に纏めました。

当時、高周波透磁率測定は、研究者毎に独自の方法で行っていて、測定結果の比較が可能なのは同一装置によるデータ間だけであり、他装置の測定結果とは異なって当然でした。このため、Olivierと我々の透磁率計のデータが定量的に一致したことが核となって、世界各地の透磁率計について性能検証が可能となり、研究グループ間で透磁率データの互換性が一気に高まりました。私も、従来以上に透磁率測定の依頼を受けるようになり、その結果が開発者の透磁率計で測ったデータと一致すると、「うちの装置は大丈夫だな」と納得されました。こうしてシールドループコイル型透磁率測定装置は、事実上の業界標準というか、研究者標準になりました。CEA/Le Ripaultには製品化の任務が無く、残念ながらCEA方式は世には広まりませんでした。

21世紀に入るとスピントロニクスの研究が活発化しました。その分野ではコプレーナ線路を磁界発生源、および信号検出器としてよく使います。その黎明期にNIST(アメリカ)のTom Silvaが仙台に来て、コプレーナ線路によるスピントロニクス測定の性能検証のために、コプレーナ線路でも図12のような構成で透磁率も測れるので、自分もラウンドロビン試験に入れて比べてほしいと相談がありました。図12右下のデータは、共鳴周波数がこの3つの方法で一致したデータです。僕と

IEC TR 63307: Measurement methods of the complex relative permeability and permittivity of noise suppression sheet

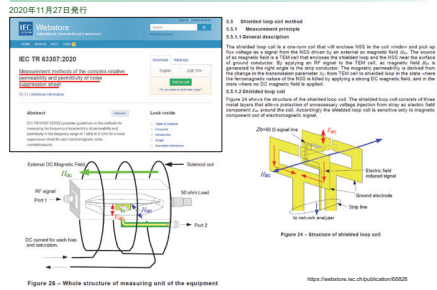


図13 IEC国際規格に登録されたシールドループコイル型透磁率測定法 (IEC TR63307)

IEC 61967-6: Integrated circuits - Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz - Part 6: Measurement of conducted emissions - Magnetic probe method

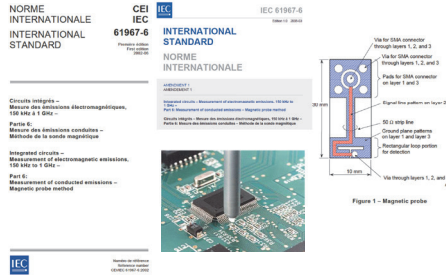


図14 LSIのノイズ計測用としてIEC規格に登録された多層平面シールドループコイル (IEC 61967-6)

しては透磁率の絶対値まで比較したかったところですが、ここで終わりました。このデータは論文にもしないまま、今日に至っています。

以上のような事実を積み上げた結果、半導体分野の人たちに、GHz帯で使える磁性体は存在することを理解して貰えるようになりました。これは意義深いことでした。

このシールドループコイル型透磁率測定装置は凌和電子と共同で開発したものです。2020年、IECでノイズ抑制シートの測定法として国際規格の中に取り込んでいただきました。

一方、多層平面シールドループコイルは、透磁率測定に限らず高周波磁界センサとして一般性が高いことに気づき、様々な分野で用途開発を模索していました。

そうしましたら、NEC EMC技術センターから、近傍磁界計測に多層平面シールドループコイルが良いと逆に持込みがあり、製品化とともに、図14に示したように2002年にはIEC国際規格になりました。標準化活動は私が直接行ったのではなく、当時岡山大学、今は京都大学の和田修己先生、それから、当時日立、今、アルティメイトテ

透磁率データの確からしさ(2)

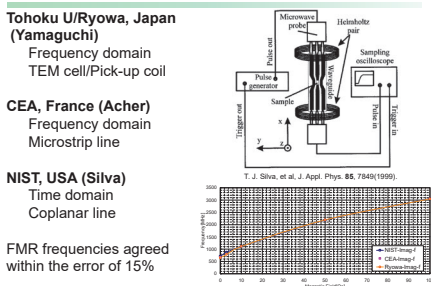


図12 透磁率データの確からしさ (2)



テクノロジーの中村 篤さんが大変尽力された成果と聞いております。お二方とも親しくお付き合いさせていただいております。

### 4. 集積化磁性薄膜インダクタ

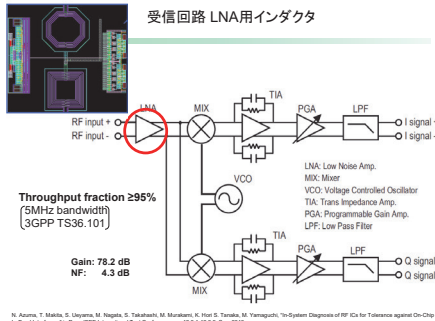


図 15 受信回路 LNA 用インダクタ

さて、ここからは第3部です。第2部のように計測技術が先行したのはよいとして、素子・デバイスとしての応用ターゲットは何かというときに、三菱電機の田邊信二さんから受信回路のLNA用マッチングインダクタがよいと提案がありました。LNAというのは、図15に○印を付したLow Noise Amplifierを指しています。アンテナの特性インピーダンスは自由空間と同じ377Ω、回路では50Ωで異なるため、LNAの入力端でインピーダンスマッチングさせます。無線通信には周波数割当がありますので、回路構成としては、その範囲でLC共振によりマッチングさせます。そのためのインダクタは空心でしたが、オフチップからオンチップへの移行に成功したので、更に磁性体を導入して小型化を推進する狙いでした。VCOやフィルタと異なり、マッチングインダクタではQ値が10~20あれば実用域でした。GHz帯で使用できる磁性薄膜が存在することは、世界

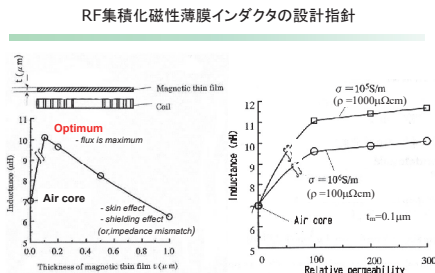


図 16 RF 集積化磁性薄膜インダクタの設計指針

に先駆けて我々が明らかにしてしまっていたので、候補材料の目処は付いていました。

田邊さんは電磁界の専門家で、膜厚は厚ければいいというものではなく、磁性体の膜面における場の反射を考慮すると最適厚みがあり、0.1μmぐらいと試算していました。これを図17左に示します。この際、図17右のように、磁性体の抵抗値は高いことが望まれます。図中、100μΩcmはアモルファス磁性薄膜として典型的な値で、これが1桁上がるとインダクタンスが20%も上がるという試算を表しています。

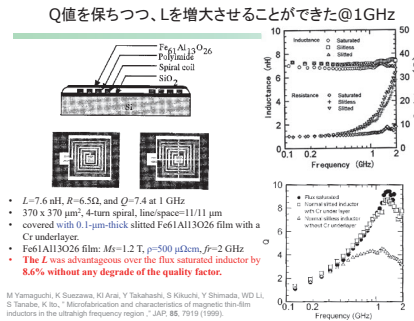


図 17 RF 集積化磁性薄膜インダクタによる GHz 帯の性能向上

それならグラニュー膜がよいと即断できました。これは金属の表面が薄い絶縁層で囲まれた構造のもので、当時から今に至るまで電磁研が得意としている材料です。当時、電磁研の大沼繁弘さんたちや、薄膜ご専門の島田 寛先生と共同研究中でしたので相談はすぐ纏まり、Fe<sub>61</sub>Al<sub>13</sub>O<sub>26</sub> (鉄、アルミ、オーと呼んでいました) を選びました。膜厚は0.1μmで良いので、研究室で常用していたミリング装置で十分試作可能でした。その結果、インダクタンスが空心より8.6%向上しました。向上の割合は小さかったのですが、大事なのは、Qが空心と同等に保てることでした。我々よりも先に、国内で同じ試みを学会発表されたメーカーがありました。インダクタンスは我々と同程度に向上したけれどもQ値は大きく低下していました。つまり、損失が大きくて、まだ使える状況にはないという発表でした。

我々は、Q値を上げるには、電磁波の反射を考慮した設計と、高電気抵抗膜の導入が有用であり、結果として空心以上の特性を1GHzで実証できたと報告できたのです。これは携帯端末の受信回路という巨大市場を持ち、GHz帯における軟磁性応用を拓く面白い結果と受け止められ、世界中

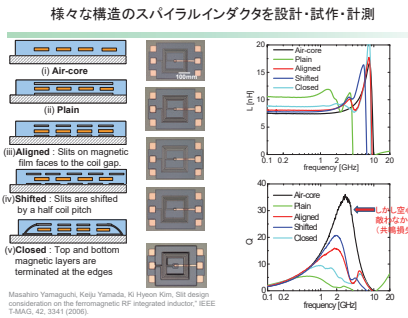


図 18 RF 集積化磁性薄膜インダクタにおけるコイルと磁性薄膜の構造設計

で研究開発がはじまりました。それから数年間は、コイルとしてはスパイラルを中心に、様々な磁性薄膜インダクタを作りました。

図18はその最後の頃、2006年の研究成果です。左側の断面図で、コイルの上下に磁性体を配置するにあたり、連続膜とスリット入り、スリット入りではスリットの位置をコイルの真上にするかコイルの半ピッチずらすか、あるいは左右端を閉じて閉磁路構造にするなどを試しました。試作プロセスは大変で、Kim Ki Hyeon 助教授、ポストドクの Bae Seok さん、池田慎治さん（現：公立小松大学）、多くの学生さんたち、江刺正喜先生の研究室と施設、CMP は磁気ヘッド用プロセスで実績と経験ある秋田県高度技術研究所（AIT）の大内先生らにお世話になりました。その大変な熱意と努力の結果としてこれらのインダクタが出来上がりました。しかし残念ながら空心には敵いませんでした。共鳴の壁は高かったのです。一方、図18右下をよく見ると、1GHzよりやや下の周波数で、少しでも磁性薄膜インダクタが空心よりQ値が高いことが分かります。はじめの試作で空心より性能がよかったのは、たまたまそこをビギナーズラックで引き当てたという結論です。

この2年後、2008年にスタンフォード大の Shan Wang さんのグループから、集中定数的な磁気回路計算により磁性薄膜インダクタの周波数特性を計算すると、磁気共鳴による損失が原因となり、GHz帯では残念ながらQ値は向上しないという報告がありました。Q値向上を目指すなら、磁気共鳴のない低周波数が良いとの結論でした。確かにその通りで、もっと早く自分で気がつけばよかったとも思いました。この指摘が転換点になり、磁性薄膜インダクタ・トランスの研究の方向性は、2つに分化したように感じます。

1つは、より共鳴周波数の高い材料開発です。

この場合、透磁率の低い材料になることが物理的に知られているので、インダクタやトランスのように、動作に必要な磁束を磁性体から得るためには、低透磁率なら厚くする必要があります。絶縁性を確保して渦電流を抑えることも必要です。つまりシリコンチップ上で厚膜プロセスを開発することが課題です。これに対して、当該材料の開発とプロセス開発を両立させた報告はまだなく、今後の展開が期待されます。

もう一つの方向性は、磁気共鳴のない低周波応

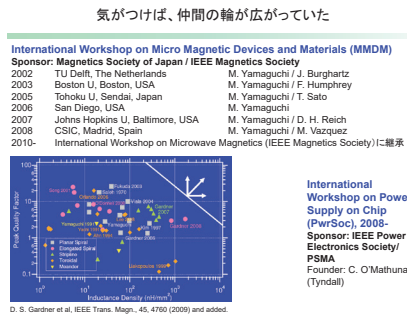


図 19 RF 集積化受動磁気素子のコミュニティ形成

用です。これはワンチップのマイクロ電源が1990年代から興味を持たれ、磁気分野とは別にパワーエレクトロニクス分野で独立した研究開発が進んでいました。こちらへ磁気研究者が合流し現在まで脈々と続いています。

私はその後、磁性薄膜インダクタの研究は開店休業中ですが、気がついてみたら仲間の輪が広がっていました。携帯端末を代表とした無線通信機器への応用は決してインダクタだけではなくて様々あり、可能性探求が続いているようです。

私も2002年にデルフト工科大学でワークショップを行ったのを端緒として2008年頃まで、毎年IEEE INTERMAGのサテライトシンポジウムとしてワークショップをよくやって、夜遅くまで議論したものです。そういう場合には、阪大の辻本浩章先生とか、信州大学の佐藤敏郎先生であるとか、アモルファス電子デバイス研究所の皆さんとか、それから海外からもご常連が集まっていました。図19で一番上の Burghartz さんは、IBM ヨークタウンハイツに籍当時に無線通信回路用インダクタをオフチップからRFICにオンチップ化すると、Q値は低下しても配線遅延や浮遊インピーダンス、専有面積、工数などの利点が勝ることを提唱し、広めていった張本人です。彼がTU Delft にデルフトに2000年に着任し、私は2001年に訪問

しました。驚くいたのは「磁性体付集積化インダクタの研究を始めたのであなたの名前を知っています」とのことでした。

翌2002年に近くのアムステルダムで INTERMAG が開催されたので、日本国内のマイクロ磁気デバイスの仲間とともに、TU Delft を訪問することになりました。先方の話を聞くのと並んで、日本はの最先端成果もアピールするために、ワークショップにして整理した報告と議論をすることにしました。これが International Workshop on Micro Magnetic Devices and Materials (略称 MMDM) の始まりです。結果的に何回か続いて、その後は IEEE Magnetics Society で、材料物理の専門家も含めて Microwave Magnetics という新分野の会議を立ち上げてきたので、それに合流して現在に至っています。とはいえ最近分野乖離が健在化しているので、2023年から MMDM の後継会議として International Symposium on Integrated Magnetics (iSIM) が創設されることになりました。第1回は仙台で2023年5月14～15日に行われます。詳しくは <https://theisim.org/> をご参照ください。

図19の右下には、「Power Supply on Chip」というパワーエレクトロニクス分野の会議を示しています。2008年から隔年で、産業界が主導したワークショップが継続しています。こちらも Integrated Magnetics という名前で、磁気素子は非常に大事だと認識されています。こちらでは TPC メンバーを何度が担当しました。

集積化インダクタ・トランス、およびセンサなどの研究開発と応用動向については、昨年、図20に示した電気学会技術報告としてまとめていますので、興味があればご参照いただきたいと思います。

参考：分野の最新動向  
オンチップRFマグネティクス

|                          |                          |
|--------------------------|--------------------------|
| 1. オンチップRFマグネティクスの概要     | 4. オンチップRF集積デバイス         |
| 1.1 オンチップRFマグネティクスとは     | 4.1 はじめに                 |
| 1.2 本書の構成                | 4.2 センサI (一般)            |
| 第1章参考文献                  | 4.3 センサII (化繊)           |
|                          | 4.4 センサIII (電力)          |
| 2. オンチップRFマグネティクスのための磁気体 | 4.5 マイクロ電磁               |
| 2.1 はじめに                 | 4.6 パラメータ抽出とノイズ抑制        |
| 2.2 フェライト材料              | 4.7 非線形共振素子              |
| 2.3 磁気体材料                | 第4章参考文献                  |
| 第2章参考文献                  | オンチップRF集積デバイスとLSIとの融合技術  |
| 3. オンチップRF共振器・共振技術       | 5.1 はじめに                 |
| 3.1 はじめに                 | 5.2 LSIからの視点             |
| 3.2 共振器の種類               | 5.3 マグネティックデバイスからの視点     |
| 3.3 MEMS共振器              | 5.4 LSIのシミュレーション         |
| 3.4 磁気共振器                | 5.5 オンチップRF集積デバイス        |
| 3.5 RF回路設計解析におけるシミュレーション | 第5章参考文献                  |
| 第3章参考文献                  | 6. オンチップRFマグネティクスの展望     |
|                          | 6.1 はじめに                 |
|                          | 6.2 フォトリソ                |
|                          | 6.3 磁気に関するナノマテリアル        |
|                          | 6.4 マグネティックデバイスとLSIの融合技術 |
|                          | 6.5 ノイズ抑制技術              |
|                          | 第6章参考文献                  |

図20 オンチップRFマグネティクス

### 5. 磁性体による無線端末用受信回路の耐ノイズ性確保技術

さて、残り10分ほどですが、第4部へ移ります。第3部で述べた共鳴損失は、周波数の狭い帯域でだけ発生するので、通信のように決まった帯域を持つ技術分野ではノイズを抑える手段として有用と思いました。この研究はインダクタ研究と並行して少し始めていましたし、ノイズ抑制シートは、トーキンから発明されて広がった仙台ゆかりの製品なので、同社の吉田栄吉さんと議論させて頂く中から、インダクタだけでなくノイズ抑制体もシリコン集積化の可能性を考えました。

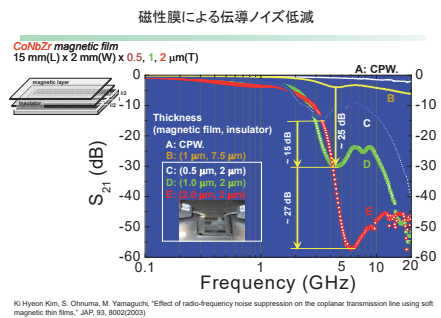


図21 磁性膜による伝導ノイズ低減

図21は、コプレーナ線路上に、絶縁層を挟んで磁性膜を一層置く簡単な構造を微細加工し、線路の右端から左端へ伝送する RF 信号の減衰量を調べた結果を表しています。これは2003年、Kim Ki-Hyeon 先生の成果です。軟磁性薄膜としては代表的な Co-Zr-Nb を用いて、膜厚が 2 μm あれば約 5 GHz で 50dB 以上もノイズを低減できるというデータです。2 μm はやや厚過ぎますが、試算してみると 0.5 μm 厚でも 10dB は低減できる見通しが立ちました。0.1 μm 以下にできれば半導体集積回路への実装も可能でしょう。それで、インダクタの研究と並行してこのノイズ抑制体の研究を本格化しました。集積化できそうなら何でも試す気概が研究室に溢れていました。

図22を使って、磁性薄膜による伝導ノイズ抑制の基本的考えを整理しておきましょう。左上は複素透磁率の周波数特性を再掲したもので、虚部が最大となる周波数が共鳴周波数です。この周波数でノイズ抑制機能が最大になります。右上図のように、この磁性薄膜を伝送線路上に置いた場合の等価回路は、抵抗とインダクタンスの直列回路で表現できます。共鳴周波数の近傍では、透磁率実部は小さいので、等価インダクタンスは無視でき、

共鳴損失の回路表現

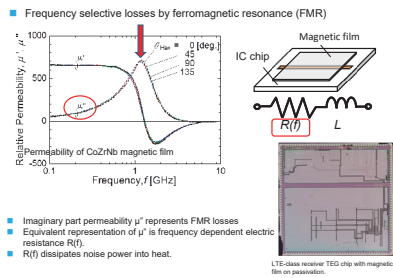


図 22 共鳴損失の回路表現

背景・増大する無線機と無線システム  
高集積・稠密化するモバイルIoT機器と無線環境

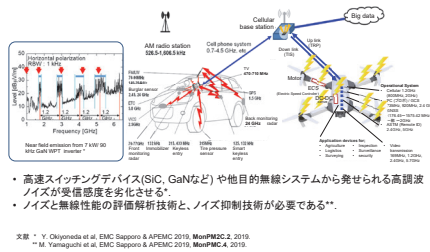


図 23 高集積・稠密化するモバイルIoT 機器と無線環境

共鳴損失に対応した抵抗によって伝導ノイズを抑制します。従来、プリント基板レベルへ適用されていた技術ですが、これを微細な IC チップレベルへ展開しました。現在に至るまでこの研究を続けています。

その目的を図23で説明します。最近は無線機が車の中やドローンの中、家の中にも増えています。これらは高速スイッチングするパワエレ回路を内蔵しており、モビリティの高い機器も急増しています。そこから基本波および低次の高調波ノイズとともに、ギガヘルツ帯に及ぶ高調波ノイズが発生していることが分かりました。微弱ですが、無線機の受信感度を劣化させます。パワエレ分野では全く知られていません。機器のモビリティが高いので、ごく近接した距離で出会うと問題になります。今後その機会が益々増えることに問題意識があります。

図24は EMC 原論の受け売りですが、ノイズが問題になるのは3つの要素が同時に揃うときです。ノイズを出すもの、ノイズを伝えるもの、そしてノイズが入ると困るものです。どれか1つ無ければノイズはあっても問題にはなりません。

ノイズが入ると困るものとして無線機の受信回路を考えると、ノイズ源には回路レベル、機器

無線通信におけるEMC技術

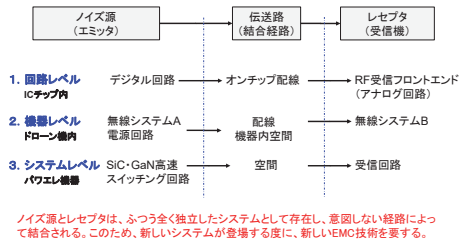


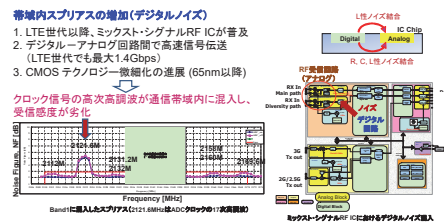
図 24 無線通信における EMC 技術

レベル、およびシステムレベルがあります。それがいずれも近傍にあります。近傍とは、学術的には1波長よりも短い距離を指し、自由空間なら周波数100kHzで3km、1GHzなら0.3m、この範囲内を近傍と呼びますが、ここでは機器の表面に、直接、携帯電話を置くような近さを想定しています。

ここで注意したいことは、ノイズ源と受信機とは、決して無線の送信機と受信機ではありません。図24のシステムレベルを例にすると、パワエレ機器と無線の受信回路を一緒に作る人はいないと思います。ところが、携帯端末が移動するとパワエレ機器と近傍で出会ってしまう。電気自動車ではパワエレと無線機が同居しています。ここで、意図しないで伝送路でノイズ結合して問題になります。今それが切実になりつつあります。

実際に取り組んだ例をお話しします。図25はLTE級RFICが世の中に出た2010年頃に顕在化した問題です。シリコンアナログ集積回路のテクノロジーが180nmから65nmへ微細化し、これに伴うトランジスタパラメータのばらつき制御や、チップ上に搭載する多数の無線システムの制御のため、RF デジタル回路がRFICに本格的に搭載

回路レベル近接EMC技術 (1) ミックスト・シグナルRF IC



文庫 5. Tanaka, IC chip level low noise technology workshop, CEWS-14, (Feb. 2011, in Japanese)

図 25 回路レベル近接 EMC 技術 (1) ミックスト・シグナル RF IC

されはじめました。すると、クロックとそれに同期した回路のスイッチングによってデジタル回路からアナログ回路へのノイズ結合が生じます。よくあるデジタルは加害者、アナログは被害者という問題が1つのICチップの中で起きる時代に突入しました。

図25左下のデータは、AD変換器のクロックの第17次高調波がBand1（下り2110～2170 MHz）の中に帯域内スプリアスとして混入して受信機の感度劣化を生じることを表しています。これは試作段階のデータです。これを基準値以下に抑える必要があります。

今後ますます使用bandが増えると、それらの間でクロック周波数の高調波が同一周波数とならないよう設計するのは困難になります。これを材料技術によって、どんな無線システムであっても帯域と目標抑制dB値が与えられれば、あとは適切な磁性体をチップ上に貼れば問題を解決できることを目指しました。

このとき、ICチップノイズ分野で活躍されていた神戸大学の永田真先生、ルネサスのモバイルマルチメディア事業部、そしてNEC EMC技術センターの方々と共同研究チームを組むことができました。永田先生とルネサスとは面識が無かったのですが、事前にご相談した結果、主たる目的を共有できました。これは力強いことでした。

LTE級RFIC受信TEGチップ

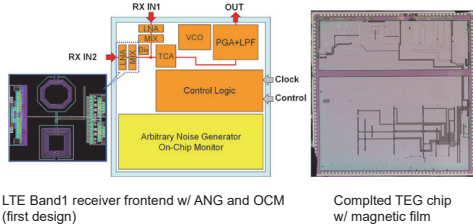
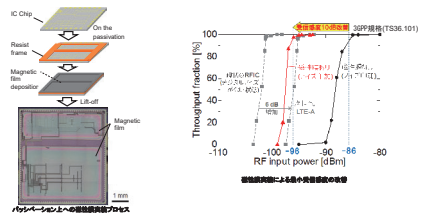


図26 LTE級RFIC受信TEGチップ

図26の中央は、そこで試作したテストチップのブロック図です。上部に一連のRF受信回路があります。アンテナポートからIQ出力まで全ての回路がLTE級RFIC実回路をルネサスが提供してくれました。そこへ永田先生がオンチップノイズモニタや意図的なノイズ発生回路を搭載して、1つのチップとして設計しました。試作はTSMCが担当しました。このチップで、3GPPの定める最小受信感度-100dBm/5MHz（帯域幅5MHz）という受信感度をきちっと出せます。図

回路レベル近接EMC技術(2)  
磁性体によるオンチップノイズ低減技術創出



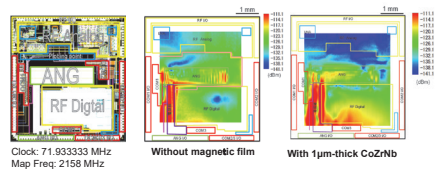
M. Yamaguchi, et al. "On-chip Integrated Magnetic Thin-Film Solution to Countermeasure Digital Noise on RF IC," Proc. Asia-Pacific EMC Symposium (APEMC2015), pp. 536-539 (2015). Best Symposium Paper Award

図27 回路レベル近接EMC技術(2)磁性体によるオンチップノイズ低減技術創出

26の右図は、そのような貴重なICチップ上に磁性体をスパッタ法で製膜しパターニングした写真です。

図27に示した通り、磁性体プロセスはシリコンプロセスの後工程としてリフトオフ法で行いました。その結果、右図のとおり、LTE通信の受信感度を10dB改善できました。大事なことは、ノイズが10dB減った一方で、信号は減衰させず、結果として受信感度を10dB向上できたことです。基礎評価からの予想ではなくて3GPP規格が決めたレベルで磁性体の有用性を示せたことは大事な結果だと思います。磁性薄膜プロセスは、当時、准教授として一緒に研究していた遠藤 恭先生が、解析関係は大学院生から助教になった室賀翔さんが非常に頑張ってくれた成果です。信号を減衰させずに、ノイズだけを低減できた理由を、以下の解析を通して説明しましょう。

受信TEGチップの近傍磁界分布



M. Yamaguchi, et al. "On-chip Integrated Magnetic Thin-Film Solution to Countermeasure Digital Noise on RF IC," Proc. Asia-Pacific EMC Symposium (APEMC2015), pp. 536-539 (2015). Best Symposium Paper Award

図28 受信TEGチップの近傍磁界分布

図28左は試作ICチップのブロック図です。研究室では製品レベルを超えた空間分解能と周波数特性を持つ近傍磁界プローブを自前で開発していましたので、それを使って試作チップ上の近傍磁界をBand1の帯域で測りました。中央の図は磁性体が無い場合の測定結果で、左上隅のノイズレベ

ルが低いことがわかります。ここにはLNAがあります。LNAは一番ノイズに弱いのでチップの端部にデジタル回路と離して、ノイズを一番受けにくい位置に置くのが回路レイアウトの常識なのだそうです。その上に磁性体を置くと、右図の上部のように、一連のアナログ回路上で近傍磁界レベルが低レベルになります(真っ青になりました)。磁性体がノイズを抑えていることが程度分かります。ただ、回路は磁性体の下にあるので、受信性能を評価して、はじめて良否がわかります。

先ほど図27でその結果を示しましたので、ここでは解析方法を紹介します。図29左上は、図28右上と同様に、受信TEGチップの近傍磁界をBand 1の帯域で測った結果で、配線が分かりやすいように色分けを変えています。これから、Band1帯域の高周波電流が流れている配線を、右上のように抽出できます。次が大事ですが、このテストチップは自分たちで設計したので、実配線が左下図のとおりであることが分かっています。これと近傍磁界計測から抽出された配線を重ね合わせると、右下のようにノイズ伝搬経路となりうる配線群をモデル化できます。

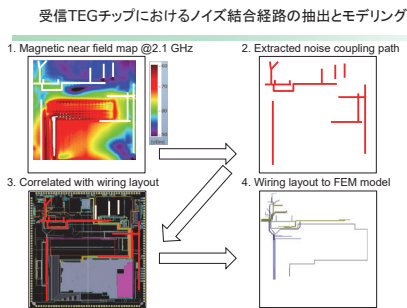


図29 受信TEGチップにおけるノイズ結合経路の抽出とモデリング

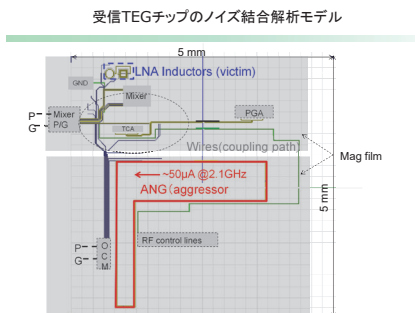
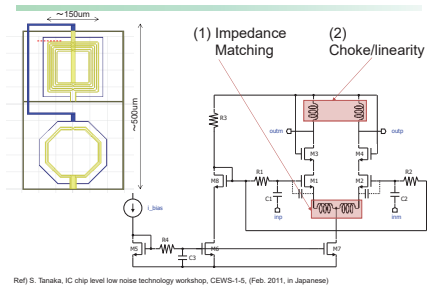


図30 受信TEGチップのノイズ結合解析モデル

LNA回路とLNAインダクタ



Ref) S. Tanaka, IC chip level low noise technology workshop, CEWS-1-5, (Feb. 2011, in Japanese)

図31 LNA回路とLNAインダクタ

図30は、この解析モデルをノイズ源のモデルとともに表示したものです。ノイズ源の物理構造はキャパシタアレイをトランジスタで同期スイッチングさせたものです。電磁界シミュレータではモデル化できないので、アレイ構造の外周に別途シミュレーションで得られたBand 1の電流値を与えたモデルとしました。これを有限要素法による電磁界シミュレータで解析しました。磁性体の透磁率の周波数特性や、方向によって透磁率が違うといったパラメータは全部入れました。電磁界解析の結果を、図31のLNAコイルのポートに与え、そのノイズの影響を回路シミュレータ(SPICE)で解析しました。

チップ・ボードレベルのノイズ結合解析

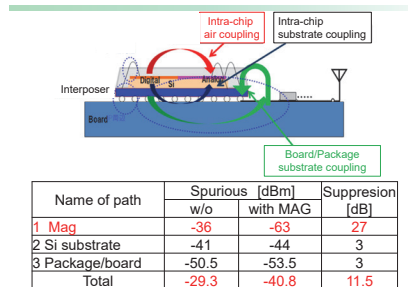


図32 チップ・ボードレベルのノイズ結合解析

一方、ノイズ結合経路はチップ上配線以外に、空間結合、基板結合、ならびにパッケージ・プリント基板を回り込む結合などがあります。図32で経路1の空間とチップ上配線に関する磁気結合は私の研究室で解析し、経路2の基板結合は永田先生、経路3のパッケージ・プリント基板結合はNEC EMC技術センターが分担して総合的に取り組みました。

その解析の結果、11.5dBだけノイズは低減する予測となりました。11.5dBの内訳は磁性体が一番効いています。このスライドに入れ忘れま

近傍磁界分布 (FEMシミュレーション)による感度向上メカニズムの探索

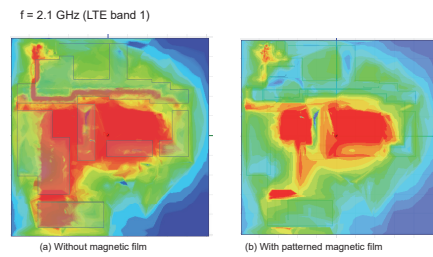


図 33 近傍磁界分布 (FEMシミュレーション)による感度向上メカニズムの探索

したが、実験ではノイズが9 dB 低減できました。解析と実験で2.5dB だけ差がありますが、両者はよく合っていると見做してよいとマイクロ波技術の専門家からコメントを頂き、我々また同じ理解でした。定量的解析がうまく出来たと思っています。

以上の結果から、シミュレーション結果を基に、信号を減衰させずに、ノイズだけを低減できた理由を考察しましょう。図33の左図は、磁性体が無い場合の近傍磁界シミュレーション結果を表しています。LNA は左上隅にあって、赤い配線を通してノイズがLNAへ混入している様子が分かります。磁性体があると、右図のように、ノイズ結合経路が切断されます。これはこの配線のノイズを磁性体がうまく抑えた結果と思われる。

翻って、チップ上におけるアナログ RF 回路の配置から、左端では2 GHz (Band 1) のキャリア周波数で動作していますが、右側に伝送されるにしたがってベースバンドに周波数が低下して、MHz 帯になります。この帯域で磁性体はほぼ無損失なので、信号を減衰させません。つまり、磁性体によって、ノイズと本来の信号とを、周波数的、かつ空間的にうまく分離できたことが、うまくいった理由でした。

各レベル共通 近接EMC技術：広帯域の不要電波評価システム

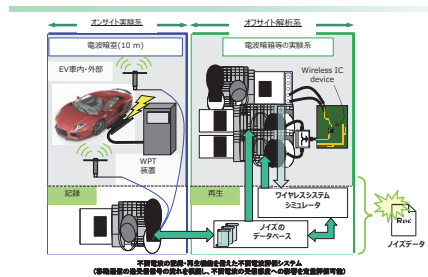


図 34 広帯域の不要電波評価システム

システムレベル近接EMC技術：パワエレ機器と通信機の共存

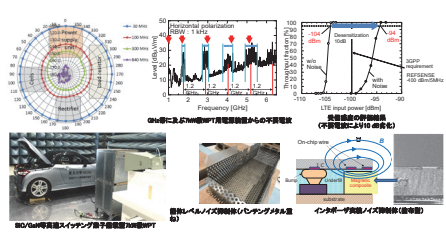


図 35 システムレベル近接 EMC 技術：パワエレ機器と通信機の共存

このメカニズムは室賀 翔さん提唱し、図33を改めて考察して、皆が納得しました。EMC Compo2015で論文化でき、学界・産業界でも認められたメカニズムです。

次に図35は、電気自動車用 WPT を SiC や GaN など最近の高速スイッチング半導体によるインバータを試作して駆動した結果です。これは、東北大 NICHe の松木英敏先生のグループが昭和飛行機とともに電気自動車と WPT の研究を推進されていたので、共同研究により GaN または SiC による最大7kW 出力のインバータを開発し、NICHe の電気自動車に WPT を装備して実現できたものです。インバータ装置は国際無線障害特別委員会 (CISPR) の基準値を満たし、WPT を装備した電気自動車はナンバープレートを取得し公道走行が可能な性能を備えています。

図35の中央上は、そのインバータからギガ帯でノイズが発生していることを示しています。SiC より GaN のほうが大きいです。無論、WPT 用送受信コイルから漏洩磁界がノイズとして観測されましたが、無線通信に影響する GHz 帯のノイズは無視できました。ノイズの無線通信への影響を神戸大学を中心とした共同研究チーム内で評価をした結果、図35右上に示したように、このノイズが混入すると受信感度が緑の枠を越えて白い枠に入って、所期の受信感度が取れないことが分かりました。

それに対する技術開発として、1つはノイズ源でノイズを抑えるようトーキングが新たにギガ帯用ノイズ抑制シートを開発しました。しかも、パンチングメタルと同一形状に開口部を設け、放熱性を確保できる実用性の高いものを作られました。

我々は受信回路への混入抑制技術が得意なので、フェイスダウン実装の IC チップを想定して、図35右下のようにインタポータのチップとプリン

インタポーザ実装ノイズ抑制体による近傍磁界ノイズ抑制効果

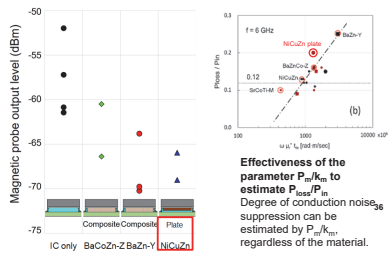


図36 インタポーザ実装ノイズ抑制体による近傍磁界ノイズ抑制効果

ト基板との間に磁性ペーストを塗布する新方式を開発しました。パンプの高さが数十μありますので、そこに磁性微粒子をコンポジット材料にして塗り込むか、あるいは薄板成形した磁性微粒子を実装することにより、受信側のイミュニティを高めました。図36はその結果で、近傍磁界のノイズレベルで評価しました。バラつきはあるものの、提案技術により5GH帯で10dB程度ノイズ低減が可能というのがこの初期のデータです。右図のように、ノイズ低減量と磁性体の透磁率あるいは模擬的伝送線路上のノイズ抑制性能とは、よく相関が取れることも見い出せました。

モビリティが高く、多数の無線システムと動力系インバータが稠密に配置された機器として、ドローンがあります。ここにも図37に示すようにノイズ問題があります。

これに対して図38のように取り組んでいます。図の右下から反時計回りに説明しますと、まず700MHz～30GHzの周波数範囲でかつ無線通信が干渉しやすい周波数帯域において、広帯域で高い透磁率を有する磁性体を開発し、次に熱プレスプロセスによってこの磁性体をプリント基板に内蔵化(ノイズ抑制構造体)するための設計技術を開発

機器レベル近接EMC技術：ドローンにおける移動通信信号と不要電波

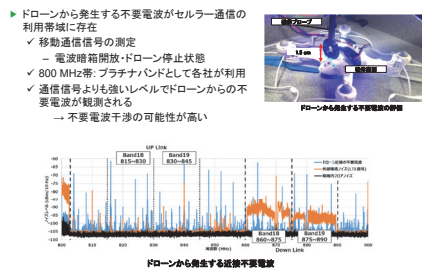


図37 機器レベル近接 EMC 技術：ドローンにおける移動通信信号と不要電波

対象とする技術範囲と連携

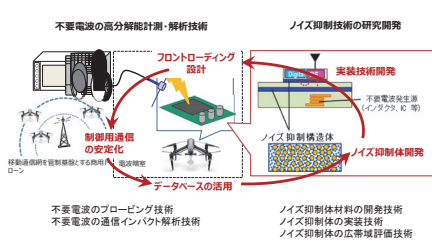


図38 ノイズ抑制技術と不要電波の高分解能計測・解析技術との連携推進

開発します。本技術によりノイズ発生源近傍に磁性体を簡便に集積化実装でき、高い不要電波の抑制効果が期待されます。磁性体とノイズ抑制構造体の良さを材料特性(透磁率と誘電率)とノイズ抑制値により定量評価するための技術を開発する。ドローンを構成する基板は、小型化が進むとともに多層高密度化されており、アンテナや高周波回路も多数内蔵されているため、ノイズ現象の把握にはシミュレータによる解析が不可欠となっていますので、材料等の定量評価値はこれに不可欠なデータベースともなります。

図の左上に回って、図の右側で開発されるノイズ抑制構造体を内蔵したプリント基板を用いて、その良さを引き出す基板設計技術を開発し、ノイズ抑制構造体の良さを電子回路レベルで高分解能で評価可能にします。次にドローンをテストベンチとして、この電子回路を機器に組み込み、動作状態において不要電波を計測する技術を開発しています。これによる測定データを解析し、複数の無線通信方式を含む無線通信システムシミュレーションにより無線通信性能を指標として不要電波干渉の分析・評価を行い、この結果をあわせて不要電波データベースに登録する技術を開発します。

本研究を、移動通信網を管制基盤とする商用ドローンの社会実装の視点からみると、その機体内

近接EMC技術による電波資源拡大へのインパクト

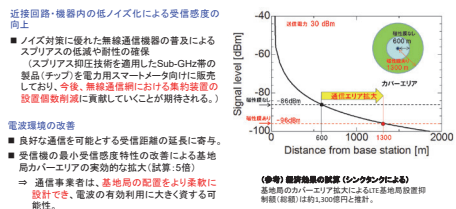


図39 近接 EMC 技術による電波資源拡大へのインパクト



における不要電波を高度に計測・解析するとともに、不要電波干渉を効果的に抑制するノイズ対策設計法を確立し、さらに、ドローンにおける不要電波対策の技術要件を定め、ドローン産業界におけるドローン機体の設計法及び試験法の普及と不要電波データの利活用を促し、安全・安定なドローン運用の基盤となる上空の良好な電波環境の維持と電波資源の効果的な利用につなげることになる。空の産業革命のロードマップにおいて、電波利用に掛かる部分に貢献できると考えています。

以上のように私は、半導体集積回路への磁性体の実装に新しい価値を見出そうと研究した結果、無線通信用受信回路のノイズ耐性を高める研究に変化してゆきました。その効果は、1つには、機器が低ノイズになると基地局から来る弱い電波を既定の最小受信感度まで適切に受信できます。もう1つは、最近、山間部や高所など人手が届きにくいところや、農業等で、無線通信の密度が疎であるが確実に送受信を要する用途が増えています。この場合、少ない基地局の数で、弱い電波を適切に送受信するニーズがあります。受信機が低ノイズであることはこの場合も効果を発揮します。この研究は継続中で、定年後も続けたいと思っています。

それから、話が飛びますが、第1部の最後に電力用高周波磁心について温度上昇とノイズが課題と申し上げました。今、パワーエレクトロニクスが脱炭素化社会実現のために人類全体として大事になっています。そこでも同様の問題がありますので、当時の問題意識を思い出しながら、今その課題に取り組んでおられる方々の背中をうまく押したいと思っています。

## 6. まとめに代えて

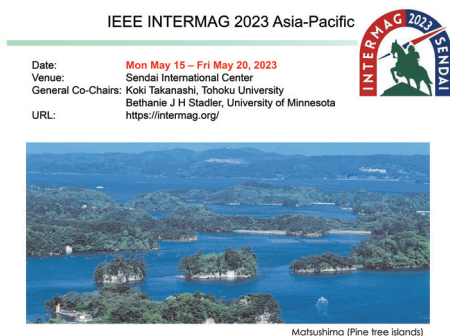


図 40 IEEE INTERMAG 2023 Asia-Pacific (2023年5月15～19日、仙台国際センターで開催予定)

最後の最後に、この講義でも何回か触れましたが、磁気応用領域のフラッグシップコンファレンスとして IEEE Magnetics Society が主催する INTERMAG があります。これが来年5月15日から仙台国際センターで行われます。ようやく仙台に来てくれます。日本としても、たしか2005年に名古屋で開催して以来、大分時間がたっています。世界のトップレベルの研究者が集まります。このときには、東北大学の磁気やスピンに関する研究室が一堂にオープンラボをするという予定もあるやにお聞きしています。そこでの出会いは、恐らく若手の大学院生、それからヤングプロフェッショナルの方々にとって新しい出会いの場となり、そこから将来への新しい課題や希望が見えると思います。

今日の私の講義の中で、海外の方々のお名前を申し上げましたが、その何人かとの出会いは過去のオープンラボの機会に知己を得た同世代の人たちです。そこから研究テーマが広がりました。これは時代を超えて繰り返されると思います。ぜひ仙台での INTERMAG がその機会となることを期待します。私もできる範囲で背中を押させていただきます。

終わりに、系内の方々には、来週、定例会議がありますが、プロジェクトのヒアリングのため欠席予定です。それも含めましてご挨拶申し上げますが、大変長いことお世話になりました。いろいろな方にお世話になり、それからご迷惑もおかけしました。おわび申し上げます。それらも含めまして、今後、皆様方がますます発展し、東北大学電気系、それから、オンラインで聞いていただいているそれぞれの方々とそのグループ、ますます発展していくようにお祈りいたします。どうもありがとうございました。(拍手)

○司会 山口先生、どうもありがとうございます。

学生時代からの研究、40年を超える研究内容を僅か1時間というところでご紹介いただいて大変感激しました。ありがとうございました。

時間は限られていますけれども、ご質問あるかと思えます。

質問のほうは YouTube のほうから伺っておりますので、そちらのほうをちょっと読み上げていただきます。少々お待ちください。

○ それでは読み上げさせていただきます。

山田啓壽様から入っています。

最終講義、ありがとうございます。研究室時

代は熱意のあるご指導、誠にありがとうございました。

先生の研究のスタイルはまさに「拓く」という言葉に合うと思っております。今後の若い世代が新しい分野を拓く、また、海外の人脈を拓くための心構えやコツなどがありましたら教えてくださいとなっております。お願いします。

○山口 ありがとうございます。

山田さんは、修士の時代、研究室で一緒に過ごした仲間でありまして、そういえば2006年だったかな、サンディエゴで開催されたINTERMAGと一緒にいった覚えがあります。

拓くというのは、拓こうとして拓いたというよりは、気がついてみると、これってひょっとしたら拓いたことになるのかなというものばかりであります。

ただし、心の奥底では、5年後には今自分が考えていることで国際会議でセッションタイトルになるような仕事をしたいと、ちょっと恥ずかしいのであんまり大きな声では言わなかったんですけど、それはいつも思っていました。

あと、僕は、分野が育ってみんなが勢いがついてくると気持ちが萎えてしまいます。この分野は自分がやらなくても育つからもういい、それよりは別分野のほうが面白そうだなといって協道にそれてしまうところがありました。

あと人脈ですが、これは大事なお尋ねをいただきました。コツは思い当たりませんが、人と話したくて仕方ありませんでした。特に、マイクロ磁気デバイスは、日本では本当に早く始まって、それは白江先生、村上先生たち、僕たちより一世代上の先生たちが拓いてくださったものを、僕たちの世代が発展させたというか、食いつなげさせていただいたのですが、海外では10年くらいほとんど研究例がありませんでした。これは寂しくまた不安でした。そのときに海外から論文が発表されると食い入るように読んだり、読み終わるとこの人と会って話したいと思うようになりました。

例えばGEのRoshenはその最初の人です。1991年にスケネクタディの研究所に行って議論した覚えがあります。行ってみたら、「2週間前に東芝の佐藤という人が来た」と。これは現信州大の佐藤敏郎先生ですね。みな考えることは同じだと思いました。

それから半導体集積回路の研究センターにも行きました。組織はUCパークレーです。RF

部隊の人たちと話をしてみず驚いたのは、回路1種類ごとに博士課程学生が1人ずつ研究しているという大きな規模感でした。それでいて横連携がきちんとできているんですね。気持ちが同じになって同じ方向を向く環境というのは大事だと思いました。はじめは常識が違う人たちが集まって何かをしようとして同じ方向を向く、ベクトルの向きをそろえる。あるいは、自分のベクトルのある部分は、別の人のこの部分と共通だと理解できると、大きな研究はスムーズに展開できるのだと思います。困難に立ち向かおうという元気がそこから出てくると思います。

お答えになっているかどうか分かりませんが、そんなところですよ。

○ それから、もう1つですが、先ほど、磁性薄膜を使ってQがあまり出なかったというお話があったんですけど、磁性膜を使うことによって単位面積当たりのインダクタンスが大きくなるわけで、そういったものを生かせるアプリの可能性というのはあるのかどうかということ、それから今後、先生がお話されたRF/マイクロ派帯で、磁性薄膜を使ったことによる実用化の可能性のある用途としては、先生のノイズ抑制体以外で、今後どのようなものがあり得るかというあたりを教えてください。

○山口 難しいお尋ねですが、まず単位面積当たりの件では、磁性体によりインダクタンスが稼げれば損失があっても使える応用として、例えばチョークコイルのように、Q値はあまり高くなくても、高周波ノイズを抑えればいいという用途であれば可能性はあると思います。実際に高周波用のトロイダルコア、リングコアでは、その用途で随分使われていると思います。あとは、月並みなお返事で恐縮ですが、パワー、サイズ、コストが見合う応用がこれからの脱炭素化社会に向かい、IoT社会が進展する中でどこかにあると思います。拓くということは、モノや考えが出た後で活動するのではなくて、この辺なら新しいモノや考えがあるかなと探し続けることだと思います。分野や組織、それに地域や性別を超えて、いろいろな人と話せるようにしていくことが大事だと思います。難しいと思いますけれども、急がば回れと思います。

あと、薄膜の用途としては、電力を扱うのではなく、そして、受動素子としての単純な機能

でもなく、センサ系に一つの活路があると思います。例えばMIセンサ（または高周波キャリア型センサ）は非常に高感度で知られていますが、一方で高周波キャリアの生成と復調が必要です。直流で動作するGMR・TMR系に対しては複雑で劣ります。ただし感度そのものは高いので、回路の工夫があれば見合うと思います。その鍵は回路を作れる半導体屋さんと一緒にやることだと思います。

- 司会 まだご質問あるかと思うんですけども、時間も迫っておりますので、私のほうでは、実は先生のところを修了された方からお手紙をいただいております、それをご紹介します。いただきたいと思います。

平成18年度修了生の丸田 佳織さんという方です。

山口先生、ご定年おめでとうございます。

最終講義をありがとうございました。

発足2年目の山口研に配属され、がらんとした研究室の環境や備品を備えるところから始めて、メンバー全員で試行錯誤的に研究をしていた日々を懐かしく思い出しています。

研究面では厳しく、学生にも常にハードルの高い課題を与える先生のご指導は、当時こそつらいと思うこともありました。今、社会人、そして中堅の立場になり、その経験の尊さを身にしみて感じているところです。改めて、熱量の高いご指導をいただきありがとうございました。今後ますますのご活躍を祈念しておりますということです。

それでは、最後になりますけれども、謝辞を電気エネルギーシステム専攻教授の遠藤哲郎先生からお願いしたいと思います。

- 遠藤 電気エネルギーシステム専攻の遠藤です。ご指名ですので、電気系職員を代表して、山口先生への御礼の言葉を述べたいと思います。

山口先生、本当に本日また改めて興味深いご講義、ありがとうございました。

先生の先見性、研究・教育活動に対する高さに改めて感銘を覚えるとともに、大きな先輩の教授の先生が巣立っていくということに対して、みんなでこの日をお祝いしたいと思います。

また、最初にご紹介ありましたように、山口先生は本学電気系ご卒業で、博士号を取得後、本学電気工学科助手に着任し、その後、電気通信研究所の助手、助教授を経て、電気通信工学

専攻、現在の電気エネルギーシステム専攻教授として、また、未来科学技術共同研究センター教授も兼任されながら、今日もご講義の中にありましたように、一貫して高周波磁気応用を念頭に置いた電磁気学とマイクロエネルギーデバイスの融合に関する研究と教育にご尽力されてきました。

思い返せば、私個人は、山口先生が荒井研の助教授の頃、私も通研に着任しまして、その頃から、いろいろ多くのことを学ばせていただきました。本当にありがとうございました。

また、研究活動におかれましても、今日ありましたように、薄膜インダクタの研究、シールドによる透磁率の測定技術の開発など、磁気デバイス、磁気計測の高周波化に取り組まれてきました。

最近では、今日もご講義の中にありましたように、我々の日常に欠かせない携帯端末、通信機器の中で起こっている電磁ノイズ干渉問題に関しまして、いわゆる基礎的な学問だけにとどまらず、チップレベル、パッケージレベルでの磁性材料による電磁磁気ノイズ抑制に関する研究にご尽力されてきました。このことを、今日も私授業を聞きながら、本当に改めて先生の足跡を再認識させていただきました。

先生の研究に対する洞察力とか、あと熱意、先ほど卒業生の方も言われていましたけれども、やっぱり先生の研究に対する熱意と、またそれを動かしていくだけの人間のネットワークのつくり方ということ、本当に刺激を受けました。

YouTubeを通じてこの最終講義を聞いている学生諸君、またOB、あとこの分野の研究者、また若手、次の世代を頑張ろうという人、きっと山口先生のご講義から何かをつかんだと思います。これがとても大事なことじゃないかというふうに考えております。

また、研究・教育活動におきましても、今日も冒頭ご紹介ありましたけれども、国際連携とか国際交流にも長らく取り組まれて、中でもIEEE、最後に先生もご紹介されてきたけれども、IEEEのMagnetics Societyでは、Distinguished Lecturerとして80か所以上の世界各国のSociety Chapterを訪問され、学会の普及活動にも努められ、また現在、Magnetics Society Presidentとして学会活動に引き続き多大なる貢献をされております。

また同時に、先ほどご紹介あったように、2023年には、これはもう巨大な学会ですよ。世界最大の学会と言っても過言ではない、IEEEの「INTERMAG 2023」の仙台への誘致活動を先頭に立って行われ、無事誘致に成功されました。この功績をたたえまして、日本政府観光局「国際会議誘致・開催貢献賞」も受賞されております。

山口先生は、今日も非常に温かなお姿でありますけれども、常に本質を突く指摘を多くいただいております。こういった事業とか研究を通じてだけではなく、私ども教授会でもよく議論があち行ったりこっち行ったりするときに、やっぱり山口先生がぱちっと本質を突く形で議論のポイントを明快に整理していただいて、このあたりの能力というのは研究だけではなくて組織運営にも大きく貢献をしていただいたものと考えております。私もこのことを学んで、少し今後も頑張っていきたいと思っております。

こういうことをいろいろ言い出しますと尽きないわけですが、このご退職の時期になりましたので、大変残念ではございますけれども、この3月に工学研究科としては現役を退かれるということになりました。ここに改めて感謝申し上げたいと思います。ありがとうございます。

なお、山口先生はこの4月からしばらく未来科学技術共同研究センター (NICHe) で電磁ノイズ制御、あとパワエレの研究開発を続けられるとお伺いしております。また機会がありましたら、高所大所から私ども電気系の職員、また学生諸君に対してご指導、ご鞭撻をいただければと思っております。

また、私個人としましても、最近パワエレ研究をさせていただいております。先生におかれましては、文部科学省の直轄事業である革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業のプログラムオフィサ(PO)を務められて、私はどちらかというとそのプレーヤーという形ですので、私はパワエレのほう、ノイズをがんがんと出す側で、先生ぜひともノイズを収めていただければと思っておりますので、今後ともどうかご指導いただければと思います。

最後になりましたけれども、改めて山口先生のこれまでの貢献に感謝申し上げるとともに、これをもって謝辞とさせていただきたいと思っております。

山口先生、本当にありがとうございます。また、これからもどうかよろしく願います。ありがとうございます。

○司会 遠藤先生、どうもありがとうございます。

それでは、名残惜しいんですけども、ここで花束贈呈をさせていただきたいと思っております。どうぞ前のほうに。

花束贈呈は藪上研究室の長瀬様と、拍手をお願いします。それから、遠藤研究室の山崎さんから花束を贈呈していただきました。

〔花束贈呈〕(拍手)

○司会 どうもありがとうございます。

それから、山口先生の手前に花が飾ってありますけれども、それは電気情報系の親睦会からのお祝いということでいただいております。どうもありがとうございました。

それでは、名残惜しいところではありますけれども、山口正洋先生の最終講義をこれにて終了させていただきます。どうもありがとうございました。(拍手)