

自己発電する電磁波シールド開発に関する研究

The study for developing an electromagnetic wave shield equipped with an energy harvesting technology by using the ferromagnetic resonance

研究代表者 大阪市立大学大学院工学研究科 教授 仕幸英治

Eiji Shikoh

The study related to developing an electromagnetic wave shield equipped with an energy harvesting technology by using the ferromagnetic resonance (FMR) was carried out. By using a high frequency magnetic field controlled by a high frequency current flowed in a transmission line, the FMR of a ferromagnetic metal (FM) film was excited and an electromotive force (EMF) was successfully generated in the FM film under the FMR. The ferromagnetic alloy composition dependence of the EMF in the alloy films under their FMR was evaluated. It was suggested that the FM with a lower magnetic damping constant was more efficient to generate an EMF under the FMR than that with a higher one. An electric power charging experiment as an energy harvesting technology by the FMR was successfully performed.

要旨

強磁性共鳴によるエネルギーハーベスティング技術を用いて自己発電する電磁波シールドを開発するための研究を遂行した。伝送線路に印加した高周波電流によって制御される高周波磁界を利用することにより、強磁性薄膜の強磁性共鳴の励起とその薄膜における起電力の生成に成功した。強磁性共鳴下の強磁性合金薄膜に生成される起電力の合金組成比依存性を評価し、動的磁化のダンピング特性が小さい強磁性薄膜のほうが起電力を効率良く生成可能であり、エネルギー変換に向いていることを明らかにした。更に強磁性共鳴下の強磁性薄膜に生成される起電力現象を利用し、温度制御を適切に行うことによって蓄電が可能であることを実証した。

1. まえがき

資源に乏しい我が国では限りある資源を有効利用するための手法を常に創出し、構築する必要がある。近年、環境に散在し、従来は見捨てられていた物や現象等から微小エネルギーを取り出し、それらを収穫してエネルギー資源として利用するエネルギーハーベスティングが注目されている⁽¹⁾。このエネルギーハーベスティングは様々な環境資源を用いて発電する技術であり、これまでに電磁波、熱、振動等を用いて電気に変換し、それを利用する試みがなされている⁽¹⁾。本研究は環境に存在する電磁波の磁界成分を利用するエネルギーハーベスティング技術の開発に係るものである⁽¹⁾。

厚さが数十 nm の強磁性体 (磁石の材料となるもの)

の薄膜に静磁界を印加すると、その薄膜内部の磁化 (磁石の根源であるスピン自由度の集まり) は静磁界の方向を一様に向く。このとき磁化は静磁界の印加方向を単純に向くのではなく、静磁界の方向を軸に歳差運動をしながら静磁界の方向に傾いていき、徐々に歳差運動の振幅が小さくなって、最終的に静磁界の印加方向に向く。一方、静磁界の印加時に、静磁界の印加方向と直角に高周波磁界を印加すると特定の条件において磁化の歳差運動が減衰することなく持続する。この状態を強磁性共鳴 (FMR) という⁽²⁾。強磁性薄膜の飽和磁化を M_s (emu/cc)、静磁界を H (Oe)、高周波磁界の周波数を ν (Hz)、強磁性薄膜の磁気回転比を γ ($0e^{-1} \cdot s^{-1}$)、磁化の歳差運動の角周波数を ω (rad/s) とすると、強磁性薄膜面に静磁界を印加する際の FMR 条件は次式で表される⁽³⁾：

$$(2\pi\nu\gamma)^2 = H(H + 4\pi M_s) \quad (1)$$

ここで $\omega = 2\pi\nu$ の関係がある。研究代表者はこの FMR を利用し、環境電磁波を捉えて起電力を生成することによるエネルギーハーベスティング技術を開発中である (図 1)⁽¹⁾。

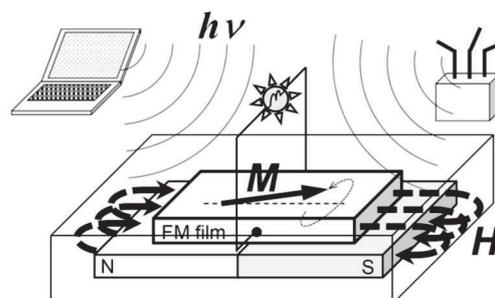


図 1 環境電磁波の高周波磁界成分を利用するエネルギーハーベスティング技術の概要。

研究代表者らはこれまでに、強磁性金属の薄膜(FM film)に対し、静磁界 H および数 GHz の周波数の電磁波 $h\nu$ の高周波磁界を印加するとその薄膜に FMR が励起され、同時に起電力が生じることを発見した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。この現象に着目し、自己発電する電磁波シールドの開発を将来的な目標とし、その関連技術を開発することが本研究の目的である。

従来、電磁波が悪影響を及ぼす場所では、例えば電磁波侵入長よりも厚い金属板でシールドし、遮蔽された電磁波のエネルギーは利用されなかった。本構想ではその廃棄されていた電磁波を FMR により電気エネルギーに変換する。即ちシールドに FM film を用い、環境電磁波を用いて FMR を励起して起電力を生成し、それを直接または蓄電して利用する技術の開発を構想している。現在、地球上の環境や宇宙空間には IoT 技術の発展に伴い、非常にたくさんの電磁波、特に GHz 帯域の電磁波が存在することは容易に想像できるが、使われない電磁波のエネルギーはこれまでノイズの原因と捉えられ、以前から環境に存在する電磁波とともに遮蔽され、廃棄されていた。一方で電磁波のエネルギーを捨てずに利用できれば、エネルギーの循環利用と省エネの双方を同時に達成できる。即ち、研究代表者が提案する、環境電磁波を用いて FM film の FMR を励起し、起電力を生成する技術を実用化する。これは工夫することにより周波数可変で利用可能な、これまでに無い局所発電技術の開発であり、また、電源の常時接続が必要無いウェアラブルデバイス用の電源のような様々な用途展開が考えられる。

これまで研究代表者らは、実験室環境においては優れた高周波磁界発生装置である電子スピン共鳴(ESR)装置を用いて、FMR 下の FM film における起電力の生成とその起源の解明に成功した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。ここで、ESR 装置は実用化に不向きである。一方、環境電磁波という、ほとんど制御されていない高周波磁界をいきなり捉えるのは極めて難しい。そこで、ESR 方式からの次のステップとして、伝送線路に高周波電流を印加し、それによる高周波磁界を用いて FMR を励起する。伝送線路方式による FMR 励起は他の研究グループでも既に行われているが、当研究グループにおける、その先の研究ステップのための基盤技術の構築のため、伝送線路方式によって FMR の励起を

行い、その際に起電力が生成されることを確認することから始めることにした。

次に高周波磁界だけでなく、静磁界の生成方法についても、一般的な FMR 実験で使用される電磁石方式では大きなエネルギー消費が発生するため、このままでは真にエネルギーハーベスティングとは呼べないので、本研究では永久磁石による静磁界を用いて FMR の励起に挑戦することにした。

続いて FM film の単位体積当たり生じる起電力の増大を目指し、FMR 下の強磁性合金薄膜に生成される起電力の合金組成比依存性を評価した。

最後に FMR 下の FM film に生成される起電力現象を利用し、キャパシタを用いた蓄電実証を試み、その特性を評価した。

2. 実験方法

2.1 試料作製

超高真空蒸着装置を用いて図2に示す構造の試料を作製した。試料基板には熱酸化膜付きシリコン基板を用いた。強磁性金属(FM)には、これまで FMR 特性や起電力特性がよく知られている $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ を主に用いた⁽⁴⁾。また、FM として Co-Fe 合金も用いた。これまで Co 単体や Fe 単体の薄膜から、FMR 下の起電力生成には成功したが⁽⁵⁾、起電力の生成と強磁性体の飽和磁化の関係が未解明なため、飽和磁化が組成比に依存して異なる Co-Fe 合金について、その組成比を変化させた実験を遂行した。FM film の膜厚 d は実験パラメータとしたが、高周波磁界の表皮効果の懸念と従来の実績から 25 nm で統一した。

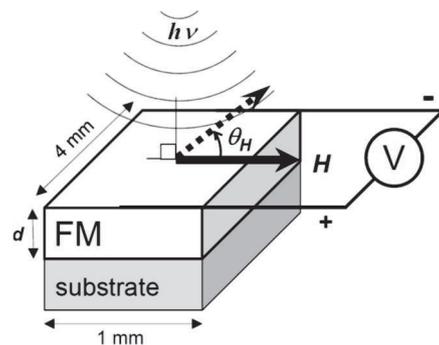


図2 試料構造および評価方法の概要。伝送線路は省略。

2.2 特性評価

伝送線路の作製にはリソグラフィ装置を用いた。本研究では伝送線路として、信号線の両側に接地線

を配置したコプレーナ型線路を用いた。研究期間中に、信号線の幅や信号線と設置線とのギャップの最適化は行わなかった。

静磁界の印加には電磁石または永久磁石を用いた。高周波電流の印加には、蓄電の実証実験を除いて、ネットワークアナライザ (Keysight Technologies, N5221A : 印加可能な高周波電流の周波数は 1 MHz ~ 13.5 GHz) を用いた。起電力の検出には電圧計 (ナノボルトメータ (Keithley, 2182A)) を用いた。図 2 に示すようにリード線の一端を試料に銀ペーストを用いて接着し、他端をナノボルトメータに配線することにより起電力を検出した。

蓄電実験における FMR の励起には大きなパワーの高周波磁界を印加したいため、本実験では ESR 装置 (JEOL, JES-TE300) を用いた。充電には電気二重層キャパシタを用いた。貯蔵した電荷量 (蓄電圧) の評価には、いわゆる RC 直列回路を組んで放電させ、放電時のキャパシタ端子間電圧の時間依存性から電圧の初期値を見積もる手法を用いた。

各測定系はコンピュータおよびソフトウェアによるプログラミングにより自動制御した。

3. 実験結果および考察

3.1 伝送線路に印加した高周波電流による高周波磁界を用いた強磁性共鳴励起と、それによる起電力生成および高周波の周波数依存性

図 3 (a) に $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 薄膜試料の FMR 特性を示す。高周波電流のパワーは +13 dBm (20 mW) である。図の横軸は薄膜試料の面内に印加された静磁界 H である。図の縦軸の ΔS_{21} は、ネットワークアナライザから伝送線路に印加された高周波電流 (高周波電力) の透過特性を表す S パラメータの一つである S_{21} 特性から、事前に薄膜試料が無い状態で測定した S_{21} 特性を差し引いたことを示すものである。即ち、高周波電流 (電力) の吸収が無ければ何も現れない (横軸に対しフラットな特性が観測される) が、電流 (電力) の吸収があれば波形の変化となって現れる。図 3 (a) では異なる 5 つの周波数における特性を、高周波の周波数を固定し、静磁界を掃引しながら評価しており、それぞれ異なる静磁界付近において、下に凸の波形が観測された。これは式 (1) の FMR 条件にまさに対応するものであり、いずれの周波数においても

FMR を正しく観測することができた。

図 3 (b) に、図 (a) の FMR 評価と同時に測定した、 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 薄膜試料に生成された起電力特性を示す。それぞれの周波数において、FMR が励起されている静磁界付近において、起電力が観測されているのがわかる。この FMR 下に生成される起電力の起源は逆スピンホール効果⁽⁶⁾が主であり、その他に、異常ホール効果などいくつかの要因が複合している⁽⁴⁾。起電力の各起源の寄与の割合は評価可能だが⁽⁴⁾、本研究では起電力の生成自体が重要であるため、割合は評価しなかった。図 3 (a) と (b) を注意深く見ると、FMR 信号が比較的強く出ている周波数での評価 (7 GHz および 9.45 GHz) においては起電力特性についても比較的大きな出力が得られているのがわかる。このことについて、まず、FMR 信号の大小については、伝送線路自体のインピーダンス整合の問題と考えられる。電流が透過しやすい周波数とそうではない周波数があり、それが FMR 特性に現れていると考えられる。即ち、FM film が高周波磁界のエネルギーを

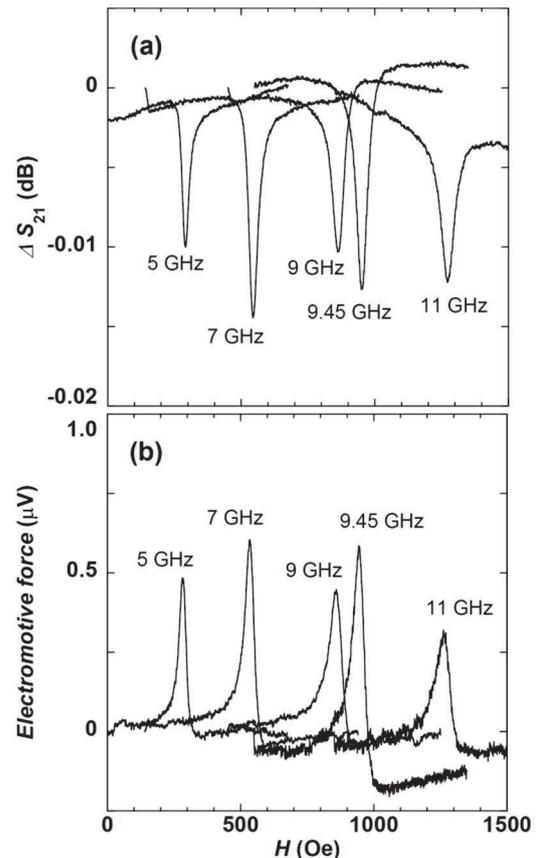


図 3 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 単層薄膜試料に対する (a) 強磁性共鳴特性の周波数依存性、および (b) 起電力特性の周波数依存性。

多く吸収した場合に、生成される起電力も大きくなったと考えられる。尚、式(1)より、周波数が大きくなるとFMRスペクトルの幅が広がるはずだが、今回、それは必ずしも明確にはなっていない。これはおそらく、伝送線路の信号線の幅が薄膜試料の幅よりも小さいので、伝送線に流れる高周波電流からの高周波磁界が薄膜に均一には印加されておらず、薄膜の一部では同条件でのFMRが励起されていないと考えられるので、それが影響したと推察した。いずれにしても伝送線路を用いたFMR励起と起電力生成に成功し、以降の研究のための基盤技術を確立した。

3.2 永久磁石の静磁界による強磁性共鳴励起

実用化に向けたステップとして、永久磁石による静磁界を印加し、FMRの励起に挑戦した。FMRの励起には一様な静磁界を対象物に印加しなければならない。電磁石の場合、電磁石のポールピースの径を大きくすることにより、一様磁界を比較的容易に生成可能である。一方、永久磁石の場合、磁極からの磁力線は、磁極から離れるにつれてどんどん疎になる（磁束密度がどんどん小さくなる）ことは、砂鉄などで遊んだことがあれば、感覚的に学んでいる（電磁気学を習わなくても知っている）。今回、実験するにあたり、まず、様々な特性の永久磁石を自在に作製できることを謳っているいくつかの業者に、一様な磁界を永久磁石で作る方法を相談してみたが、いずれの業者からも「一様な」という点において難色を示された。一方で、強さの異なる永久磁石は比較的容易に、しかも安価で得られることがわかったので、なるべく一様な静磁界を作り出すべく、様々な磁石の導入、および磁石の配置方法をいくつか検討するところから始めることにした。

図4に、円筒形の永久磁石を2つ用いて一様な静磁界を得る方式の実験装置周辺写真を示す。2つの永久磁石を、薄膜試料を挟むように配置することにより電磁石のポールピースと同様な状況を作り、一様な静磁界を印加する試みである。永久磁石を支えるステージ等は本実験のために導入したものであり、実用化時には邪魔になるが、永久磁石でFMR励起を達成することがとにかく実施すべきことであるので、周辺部の構築は将来課題とした（FM filmを小さくすれば測定系全体を小さくすることは可能）。

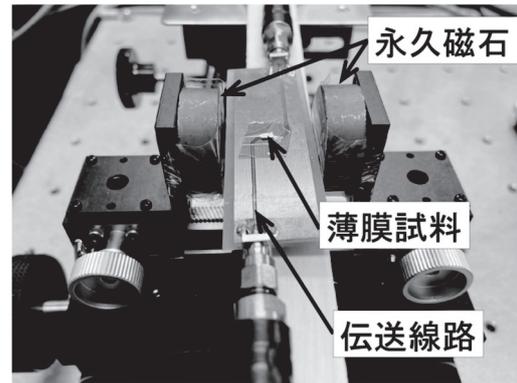


図4 構築した永久磁石方式による強磁性共鳴特性評価装置。

図4の磁石はフェライト磁石だが、強磁性共鳴条件を満たせばよいので、磁極の強さの異なる磁石を、形状や材質を変更することにより準備した。また、図4の永久磁石配置方式以外にも、2つの永久磁石を、伝送線の下側の、薄膜試料直下から少しだけ離れた場所に、磁極の向きが互いに逆になるように配置する方法、即ち静磁界を薄膜の面直方向から導入しつつ、薄膜部分では薄膜の面内に印加する方式も試した。更に一つの磁石内に多極構造を有する磁石についても、同様に試した。尚、永久磁石の磁極表面に直接薄膜を貼り付ければほぼ一様な磁界が試料に印加される。しかしながら薄膜の面直方向に静磁界を印加する場合にはFMR条件が変わり、GHz帯の高周波磁界で試料が $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ の場合には、10,000 Oeくらいの静磁界が必要になって実用化には向かないので、静磁界を薄膜面内に印加する方式のみ試した。

図5に、同一の $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 薄膜試料（図3の実験とは異なる試料）に対し、(a)静磁界を電磁石で印加してFMR励起を試みた実験と、(b)静磁界を永久磁石で印加してFMR励起を試みた実験例を示す。高周波電流のパワーは+13 dBm (20 mW)である。(b)における永久磁石配置は、図4の写真で示した方式である。注意点として、図5の横軸が図3の実験と異なり、高周波電流の周波数になっていること、即ち、静磁界を固定して、周波数を掃引しながら評価した特性である。また、図5の縦軸の ΔS_{21} は図3と同じ定義であるが(a)と(b)の間でレンジが桁程度異なることにも注意していただきたい。

図5(a)の電磁石による静磁界印加方式 ($H = 741$ Oe) では、式(1)のFMR条件が満たされる所定の周波数付近 (8.5 GHz 付近) においてFMR信号が正しく

観測されている。一方、図5 (b)の永久磁石（フェライト磁石）による静磁界印加方式 ($H = 740$ Oe) の場合、8.5 GHz 付近には明確な FMR 信号が見えていない。(a)と比較してS/N比が明らかに悪く、また、(a)のFMR信号の大きさから考えると、FMRが励起されていてもノイズに埋もれてしまっていることになる。同様のノイズの問題は今回用いた全ての永久磁石方式にて生じた。静磁界の印加方法を電磁石から永久磁石にただで、S/Nが非常に悪くなってしまふ理由はまだ解明できていない。起電力特性は評価していないが、仮にFMR信号がノイズの問題で見えなくても、起電力特性を評価すれば観測できる可能性はある。また、永久磁石の個体差が一樣磁界の形成に影響したかもしれない。S/Nの問題は今後の課題である。一樣性を高めるために、例えば図4の方式ならば円筒形磁石の直径を大きくするか、試料を小さくする必要がある。また、起電力を上記のと

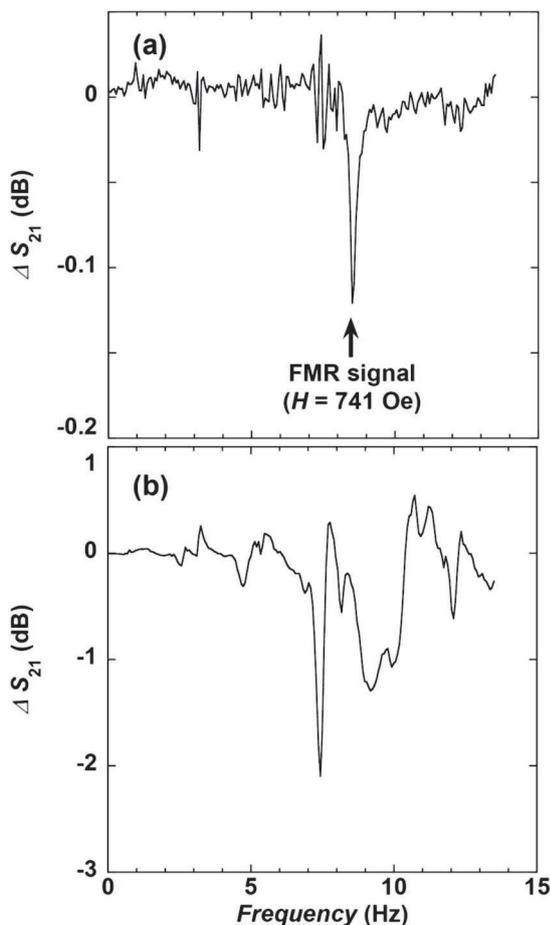


図5 同一薄膜試料に対する強磁性共鳴励起実験の例。(a)電磁石による静磁界印加方式。(b)永久磁石による静磁界印加方式。

おり測定すれば見えてくるかもしれない。最近、卓上MRI（磁気共鳴画像）を開発中の方々が同様に一樣な静磁界を得るために、磁石の前に鉄板等を置くことによって磁界が一樣になる領域を広げる試みがあり⁽⁷⁾、参考になるかもしれない。ただしS/N比が悪い課題は解決しない。そこで将来構想とは真逆になるが、一旦、電磁波のシールドルーム（電波暗室）等での実験を、あるいは試料周りだけを金属板で覆うなどの対策を施したほうがよさそうである。

3.3 強磁性共鳴下の強磁性合金薄膜に生成される起電力の合金組成比依存性の評価

当初用いていたESR方式の場合、大きなパワーの高周波磁界を比較的容易に利用することができ、生成される起電力はパワーに比例した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。一方で実用化のためには非常に微弱な電磁波も収穫しなければならない。そもそも大きな起電力が得られれば、先のS/N比の問題も気にならなくなる。そこで体積が同じ薄膜ならばエネルギー変換効率（発電効率）が高い強磁性体を用いたほうがよく、飽和磁化の大きな強磁性体がそれに相当する可能性がある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。磁性物理学における、様々な強磁性合金における飽和磁化の合金組成比依存性を表すスレーター・ポーリング曲線によれば、FeとCoの合金において飽和磁化が最も大きくなることが知られている⁽⁸⁾。幸いなことに研究代表者らはこれまでにCo単層膜およびFe単層膜に対し、それぞれのFMR下において起電力を取り出すことに成功している⁽⁵⁾、Co-Fe合金薄膜の組成比依存性の実験は興味深いところがあったため、それを遂行した。

図6にFMR下のCo-Fe合金薄膜に生じる起電力のCo-Fe組成比依存性を示す。評価には電磁石による静磁界および伝送線路に印加した高周波電流からの高周波磁界を用いている。高周波電流のパワーは+13 dBm (20 mW)である。起電力の成分には様々なものが含まれるが、解析の結果、合金自身における逆スピンホール効果が支配的であり、図6では逆スピンホール効果による起電力をプロットしている。各組成比において複数の試料を評価している。破線は組成比依存性がわかりやすいようにフリーハンドで描いている。図6より起電力は合金中のCoの割合が増えると最初は小さくなるが、Coが50%くらい

の合金から起電力が大きくなっていき、全て Co の場合 (Co 単体) が最も起電力が大きいことがわかった^{[2][3]}。Fe 単層膜よりも Co 単層膜のほうが、起電力が大きい点は過去の実験⁽⁵⁾と一致する。一方、Co-Fe 合金の飽和磁化は、スレーター・ポーリング曲線が教えるところでは Co が 25%程度するとき最も大きくなる⁽⁶⁾。したがって、先の飽和磁化が大きいとエネルギー変換効率が高い可能性とは真逆の結果である。そこでこの理由をいくつかの実験を通して調査した。

まず、起電力検出のための端子間距離が起電力に比例するため、銀ペーストで端子付けした際の銀ペースト塗布面積の違いを検証したが、問題がないことを確認した。次に Co-Fe 合金薄膜が酸化した可能性を考え、薄い非磁性金属でカバーした試料で検証したが結果は変わらなかった (カバー材料の非磁性金属が起電力を生成している可能性も検証し、問題無いことを確認した)。

そこで更に本質的な調査を行った。FM film の FMR 実験を行うと、FMR スペクトルの吸収線幅から動的な磁化過程の振舞の減衰特性を評価することができ⁽²⁾、いわゆるダンピング定数という値で磁性材料の特性を評価できる。例えば $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ はこの値が小さいので、FMR を効率良く励起することができる。Co-Fe 合金薄膜に対し、この評価を実施したところ、ちょうど図 6 の起電力の組成比依存性の大小関係と真逆になるようなダンピング定数の組成比依存性、即ち、Co が 50%のくらいとき、ダンピング定数が一番大きく、Co が 100%のとき、ダンピング定数が最も小さく

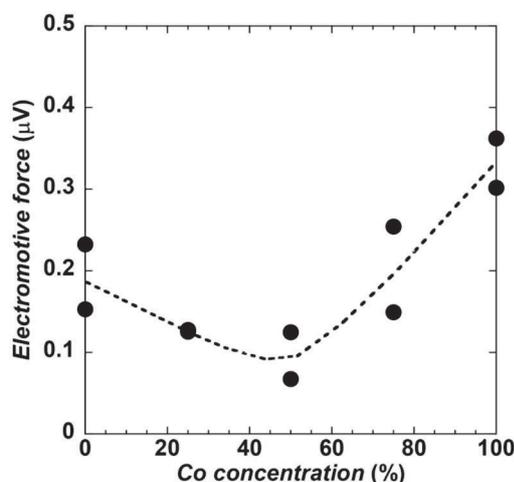


図6 強磁性共鳴下の Co-Fe 合金薄膜に生じる起電力の合金組成比依存性。破線は依存性の目安のためにフリーハンドで描いている。

なった。要するに $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ と同様に、ダンピング定数が小さいほど FMR を効率良く励起することができ (高周波磁界から効率良くエネルギーを吸収することができ)、結果として大きな起電力を生成できることがわかった。即ちエネルギー変換において、飽和磁化については強磁性体である以上、重要ではあるが、現在構想しているエネルギーハーベスティング技術において、動的磁化の減衰特性が強く影響することを明らかにした^{[2][3]}。実用化に向けた重要な知見を得ることができた。

3.4 強磁性共鳴下の強磁性合金薄膜に生成される起電力の生成現象による蓄電の実証

FMR 下の FM film に生じる起電力現象による蓄電の実証を試みた。FM film には $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ および Co-Fe 合金薄膜を用いた。高周波磁界のパワーは 200 mW (利用した ESR 装置の最大値) とした。ESR 装置の共鳴周波数は 9.45 GHz に固定であり、式(1)の FMR 条件を満たすように静磁界を設定し、FMR 状態を所定の時間だけ維持した。蓄電評価用に準備した RC 直列回路にはスイッチをいくつか組み込んで、リーク電流等の影響には十分に注意して実験を遂行した。放電時のキャパシタンス端子間電圧の時間依存性の評価を容易にするため、回路の時定数が 1 秒になるように抵抗値およびキャパシタンスの値を設定した。

まず、 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 薄膜を用いたところ、うまく充電できなかった。試料や回路の状態なども含めて問題無いことを確認し、何度か挑戦したが充電がうまくできなかった。

次に、FM film として Co-Fe 合金薄膜を用いた。図 7 に FMR 下の Co-Fe 合金薄膜に生じる起電力現象を用いた蓄電実験として、キャパシタンスに蓄えられた電荷量 (キャパシタンスの端子間電圧として計測) の充電時間、即ち FMR の持続時間依存性を示す。充電時間が 10 分を過ぎたあたりから蓄電圧が充電時間に比例して増大する特性が得られた。念のため FM film を作製し直して実験を行ったところ再現性が得られた。即ち FMR 下の FM film に生成される起電力を用いた蓄電の実証に初めて成功した^[4]。充電時間が短い (10 分未満) と蓄電圧の変化量が大きい現象については $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 薄膜を用いた場合でも観測されたことから電気二重層キャパシタ特有の現象と

考えている。また、10分以上の充電時間となった場合、 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 薄膜ではうまくいかなかったが Co-Fe 合金で成功した理由として、前述したダンピング定数の違いによる実験状態の相違を考えている。ダンピング定数が大きい場合、FMR スペクトルの線幅が大きくなる（例えば図3(a)の各スペクトルの共鳴幅（共鳴開始から共鳴終了までの静磁界の範囲）が大きくなる）。ESR 装置の場合、測定室（キャビティ）は密封されており、共鳴時のキャビティ内部は電子レンジのように加熱される。FM film の飽和磁化 M_s は温度が上昇すると小さくなるので、共鳴周波数が一定の場合、共鳴磁界（静磁界）は式(1)より温度上昇とともに大きくなる。即ち、 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ の場合、利用した ESR 装置の温度特性に依存して、FMR が持続可能な磁界範囲から外れてしまったと考えられた。もちろん Co-Fe 合金でも温度上昇とともに同じことが生じるが、前述のとおり FMR スペクトルが広いので、熱平衡状態となった際の FMR の励起効率は下がっても共鳴状態を維持することができ、充電が連続的に可能だったと考えられた^[4]。即ち、温度制御を適切に行うことにより、所望の蓄電が可能になることを明らかにした。

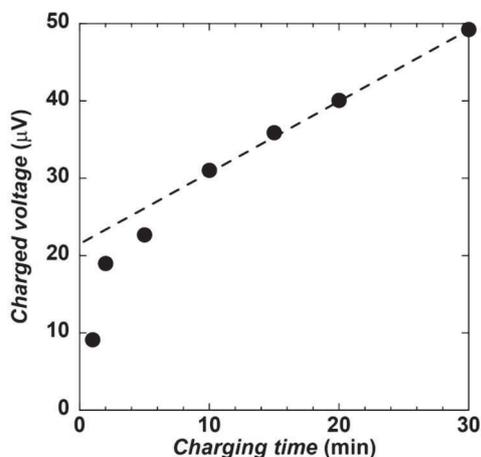


図7 強磁性共鳴下の Co-Fe 合金薄膜に生じる起電力を用いた蓄電実験。破線の直線は依存性の目安として描いている。

4. まとめ

強磁性共鳴を用いるエネルギーハーベスティング技術を使って自己発電する電磁波シールドの開発のため、伝送線路に印加した高周波電流による高周波磁界を用いた強磁性共鳴励起による起電力生成およびその周波数依存性の評価、永久磁石の静磁界によ

る強磁性共鳴励起、強磁性共鳴下の強磁性合金薄膜に生成される起電力の合金組成比依存性を評価し、そして、この現象を利用した蓄電実証実験を実施した。伝送線路方式による強磁性共鳴励起と起電力の生成を達成し、また、それらの周波数依存性の評価から、強磁性共鳴条件を満たす所定の結果を得ることができ、今後の開発に向けた基盤技術の構築に成功した。永久磁石の静磁界を用いる強磁性共鳴励起実験については、評価手法の構築は終わったものの、測定ノイズの削減が不十分であり、今後の課題が多く残った。強磁性共鳴下の Co-Fe 合金薄膜に生成される起電力の合金組成比依存性の評価に成功し、低ダンピング特性を有する強磁性薄膜のほうが大きな起電力を生成できること、即ちエネルギー変換において、強磁性体の飽和磁化とともに、動的磁化の減衰特性が強く影響する、という実用化に向けた重要な知見を得ることができた。更に、強磁性共鳴下の強磁性薄膜に生成される起電力現象を利用し、温度制御を適切に行うことによって蓄電が可能であることを実証した。

5. 今後の課題と展望

一連の評価系の構築や、起電力増大の一つの手段の確立、そして蓄電の実証など、重要技術の確立に成功したが、静磁界を永久磁石方式にした際の S/N 比の問題は実用化のためには早急に解決しなければならない。但し、3. 2でも述べたように、FMR の観測ができていなくても起電力が生成している可能性があるため、ノイズ減少の取り組みをしつつ、評価方法を変更して確認する。並行していくつかの基盤技術を実証する。特に、原理的には共鳴条件の異なる素子を直列接続することにより、周波数可変で利用できるため、その実証実験を行う。現実環境においてはまさに今、GHz 帯域の高周波が汎用されているが、当技術は原理的に THz にも、更には、より高い周波数まで対応できるため、実用化したい。

謝辞

電子スピン共鳴装置を用いた実験について大阪市立大学大学院理学研究科の手木芳男教授に感謝申し上げます。実験全般に関し、当研究室の大学院工学研究科電子情報系専攻前期博士課程の野木雄太氏、

白承根氏, 工学部電気情報工学科の奥村直樹氏, 坂井智紀氏, ならびに関係各位に感謝申し上げます。

本研究は公益財団法人マツダ財団助成金により行われました。関係各位に感謝を申し上げます。

発表論文

- [1] 仕幸英治, 強磁性共鳴によるエネルギーハーベスティング, 電気学会研究会資料, Vol. 133-146, pp. 55-59 (2019). 2019年12月.
- [2] 白承根, 手木芳男, 仕幸英治, 強磁性共鳴による Co-Fe 合金単層膜自己誘起逆スピンホール効果, 第44回日本磁気学会学術講演会(令和2年12月14-17日 オンライン開催), 講演番号16pB-5, 講演日2020年12月16日.
- [3] S. Baek, Y. Teki, and E. Shikoh, Composition dependence of the self-induced inverse spin-Hall effect in Co-Fe alloy single-layer films under their ferromagnetic resonance, in preparation.
- [4] Y. Nogi, Y. Teki, and E. Shikoh, An energy harvesting technology by using a thin ferromagnetic metal film under the ferromagnetic resonance, in preparation.

参考文献

- (1) (例えば) 秋永広幸, エネルギーハーベスティング技術の展開, 応用物理, Vol. 89, no. 6, pp. 321-327 (2020). など.
- (2) 齊藤英治, 村上修一, スピン流とトポロジカル絶縁体, 共立出版, (2014).
- (3) C. Kittel, On the Theory of Ferromagnetic Resonance Absorption, Phys. Rev., Vol. 73, pp. 155-161 (1948).
- (4) A. Tsukahara, Y. Ando, Y. Kitamura, H. Emoto, E. Shikoh, M.P. Delmo, T. Shinjo, and M. Shiraishi, Self-induced inverse spin Hall effect in permalloy at room temperature, Phys. Rev. B, Vol. 89, pp. 235317-1 - 235317-6 (2014).
- (5) K. Kanagawa, Y. Teki, and E. Shikoh, Self-induced inverse spin-Hall effect in an iron and a cobalt single-layer films themselves under the ferromagnetic resonance, AIP Advances, Vol. 8, pp. 055910-1 - 055910-4 (2018).
- (6) E. Saitoh, M. Ueda, H. Miyajima, and G. Tatara, Conversion of spin current into charge current at room temperature: Inverse spin-Hall effect, Appl. Phys. Lett., Vol. 88, pp. 182509-1 - 182509-3 (2006).
- (7) T. Oka, N. Inoue, S. Tsunoda, J. Ogawa, S. Fukui, K. Yokoyama, N. Sakai, M. Miryala, M. Murakami, M. Takahashi,

and T Nakamura, Formation of uniform magnetic flux distribution for NMR magnets using HTS bulk magnets activated by pulsed-field magnetization, Mater. Res. Express, Vol. 7 056001-1 - 056001-6 (2020).

- (8) 太田恵造, “磁気工学の基礎 I”, 共立出版, (1973).