

令和 4 年度

卒業論文

Rayleigh 波によるスピノン流生成における  
スピノン軌道相互作用の寄与

武藤永治

学籍番号 : 61819045

指導教員 : 能崎幸雄

慶應義塾大学

理工学部物理学科

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	3
1.1	研究背景	3
1.2	磁気回転効果を用いたスピン流生成に関する先行研究	4
1.3	研究目的	4
<b>第 2 章</b>	<b>原理</b>	5
2.1	Rayleigh 波	5
2.1.1	弾性体のひずみテンソル	5
2.1.2	ひずみと応力	6
2.1.3	弾性体を伝わる波	7
2.1.4	Rayleigh 波	9
2.2	スピン渦度結合によるスピン流生成	13
2.2.1	スピン流	13
2.2.2	スピン蓄積	14
2.2.3	スピン渦度結合	15
2.2.4	スピン渦度結合によるスピン流生成	17
2.3	磁気共鳴	20
2.3.1	LLG 方程式	20
2.3.2	強磁性共鳴	23
2.3.3	スピン波共鳴	25
2.3.4	STT によるスピン波共鳴	26
<b>第 3 章</b>	<b>実験方法</b>	28
3.1	試料作製	28
3.1.1	素子設計	28
3.1.2	素子作製	29
	洗净	29
	レジスト塗布	29
	描画	29
	現像	30
	蒸着	30
	リフトオフ	30
3.2	測定方法	31
3.2.1	ベクトルネットワークアナライザ測定	31

3.2.2 ゲーティング処理	32
3.2.3 測定系	32
<b>第4章 実験結果</b>	<b>34</b>
4.1 IDT 素子測定結果	34
4.2 試料測定結果	37
4.2.1 Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40) の測定結果	38
4.2.2 Pt(6)/NiFe(20) の測定結果	40
4.2.3 Mn(6)/NiFe(20) の測定結果	42
4.2.4 Pt(40)/NiFe(20)/Mn(40) の測定結果	43
4.2.5 NiFe(20) の測定結果	45
4.3 層構成の違いによる STT-SWR 励起強度の比較	46
<b>第5章 考察</b>	<b>48</b>
5.1 Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40) と Pt(40)/NiFe(20)/Mn(40) の比較	48
5.2 Pt(6)/NiFe(20) と Mn(6)/NiFe(20) の比較	49
5.3 NiFe(20) 単層とその他の試料の比較	50
<b>第6章 結論と今後の展望</b>	<b>51</b>
6.1 結論	51
6.2 今後の展望	51
<b>参考文献</b>	<b>52</b>
<b>謝辞</b>	<b>54</b>

# 第1章

## 序論

### 1.1 研究背景

物質の性質のほとんどを決めているのは主に物質に含まれる電子である。電子はマイナスの電荷を持っておりさらにスピン角運動量と呼ばれる内部自由度を持つ。

現代社会においてエレクトロニクスは家電製品や情報通信機器など日常生活のあらゆる場面で必要な技術となっているが、基本的にこれは物質中の電荷と電流によって駆動されている。一方で電子のスピンを利用してきた学問領域が磁気工学(マグネティクス)であり、磁化の起源である電子スピンの性質を理解して制御することで性能の良い磁石などがつくられ、磁気工学は物性物理学の格好の応用例となった。

こうして電子の電荷とスピンがエレクトロニクスと磁気工学にそれぞれ活用された状況は1990年代にナノテクノロジーが大きく進展することによって統合されて新しい学理体系が構築された。これはスピントロニクスとよばれ、巨大磁気抵抗効果という強磁性層と非磁性層を交互に積み重ねた素子に電流を流すと電気抵抗が大きく変化する新規物理現象が発見され、またたく間に実用化された。

スピントロニクス研究の進展に伴い、電子スピンの流れであるスピントロニクスに注目が集まるようになった。物質中でスピントロニクスはごく短い距離で減衰してしまうが、近年のナノテクノロジーの進展によってスピントロニクスが減衰する距離よりも短いスケールの物性を調べることが可能となり、スピントロニクスのもたらす現象が次々と発見された。特にスピントロニクスによる磁化反転現象によりナノサイズの強磁性体の磁化方向を磁場を印加せずにスピントロニクスを強磁性体に流すことで制御することが可能となり、強磁性体を利用した新しいメモリ素子であるスピンドルランダムアクセスメモリ(Magnetic Random Access Memory: SpinRAM)を可能にした。

スピントロニクスの生成方法については数多くの研究がなされている。例えば強磁性体からの非局所スピントロニクス注入や強磁性体/非磁性体二層膜の温度勾配によるスピントロニクスゼーベック効果などがある。他にも強磁性体の磁化の歳差運動によって、接合された非磁性金属にスピントロニクス角運動量が受け渡されてスピントロニクスが注入されるスピントロニクスポンピングやスピントロニクス軌道相互作用(spin-orbit interaction: SOI)の大きな重金属に電流を流したときアップスピントロニクスとダウンスピントロニクスが互いに逆向きに電流と垂直方向に散乱されることでスピントロニクスが生成されるスピントロニクスホール効果やラシュバエーデルシュタイン効果と呼ばれる界面でのSOIによって空間反転対称性が破れて面内方向の電流が面直方向のスピントロニクスに変換される効果もある。

これらの手法はすべて強磁性体、SOIの強い重金属や希少金属を必要とし、これらを用いずにスピントロニクスを生成することはスピントロニクスにおいて重要な課題である。

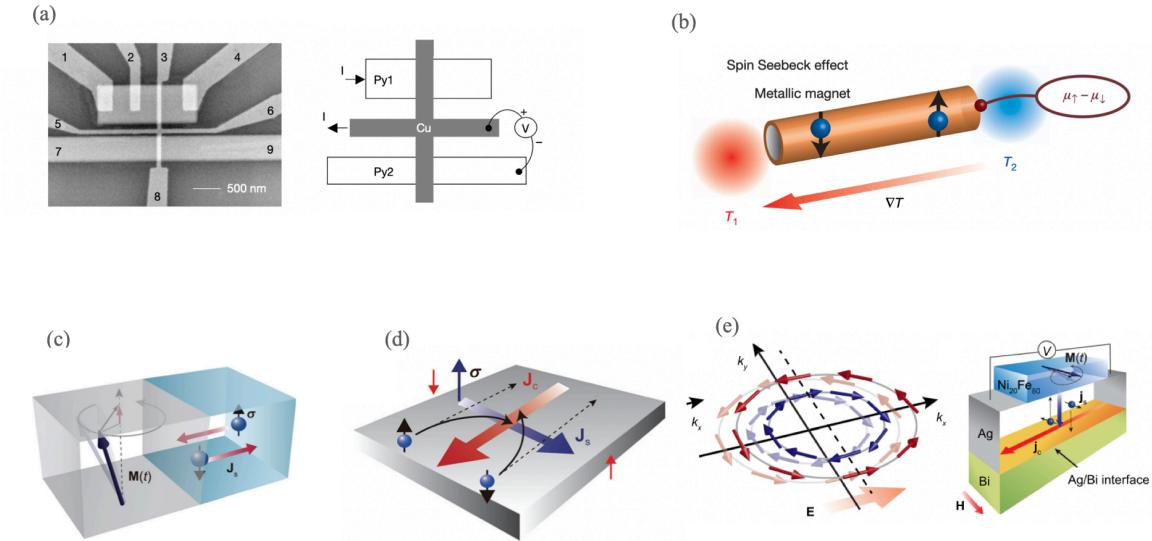


図 1.1 スピン流生成の概略図: (a) 強磁性体からの非局所スピン注入 [5](b) スピンゼーベック効果 [16](c) スピンポンピング [2](d) スピンホール効果 [2](e) ラシュバエーデルシュタイン効果 [12]

## 1.2 磁気回転効果を用いたスピン流生成に関する先行研究

近年、ミクロなスピン角運動量とマクロな力学的回転運動との結合であるスピン回転結合 (spin-rotation coupling: SRC) によって、スピン軌道相互作用の弱い非磁性金属を用いた新たなスピン流生成理論が Matuo らによって提唱された [11]。Matuo らは表面弾性波 (surface acoustic wave: SAW) や流体運動の作る渦度と電子スピンとの相互作用であるスピン渦度結合 (spin-vorticity coupling: SVC) を利用して、渦度中のスピン流生成メカニズムを説明した。

このスピン流生成方法は、Kobayashi らが Cu/NiFe 二層膜に Rayleigh 型表面弾性波 (R-SAW) を注入し、実証実験がなされた [6]。さらに Kurimune らは Cu と Pt,Ti における SAW による SVC 由来のスピン流を比較し、SVC を用いたスピン流生成において SOI の影響は大きくはない結論づけた [8]。

## 1.3 研究目的

先行研究によって SAW による SVC を介したスピン流生成が実験や理論から報告されているが、このスピン流生成法における SOI の寄与については以前として明らかになっていないところも多い。そこで本研究ではスピンホール角が正の材料と負の材料を用いて生成されるスピン流の量を評価することにより、SOI の寄与について調べた。

# 第2章

## 原理

### 2.1 Rayleigh 波

#### 2.1.1 弹性体のひずみテンソル

弹性体は引っ張ったりねじったりすると変形する。変形する前の物質の場所(固体なら格子)の座標を  $\mathbf{r}, \mathbf{r}'$  で指定し、その本来の場所  $\mathbf{r}, \mathbf{r}'$  からのひずみの大きさをベクトル  $\mathbf{u}, \mathbf{u}'$  で表す。このとき弹性体がひずむことによって相対位置ベクトルは次のように変化する。

$$\mathbf{r}' - \mathbf{r} \rightarrow (\mathbf{r}' + \mathbf{u}') - (\mathbf{r} + \mathbf{u}) = (\mathbf{r}' - \mathbf{r}) + \delta\mathbf{u}. \quad (2.1)$$

$\delta\mathbf{u}$  は場所  $\mathbf{r}, \delta\mathbf{r}$  の関数であり、 $\delta\mathbf{r}$  の一次まで展開して行列表示すると

$$\begin{pmatrix} \delta u_1 \\ \delta u_2 \\ \delta u_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} & \frac{\partial u_1}{\partial x_2} & \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_2}{\partial x_1} & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial u_3}{\partial x_1} & \frac{\partial u_3}{\partial x_2} & \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \delta x_3 \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

この行列を相対変位テンソルといい、 $D(\mathbf{r})$  で表すと (2.2) は次のように書かれる。

$$\delta\mathbf{u} = D(\mathbf{r})\delta\mathbf{r}. \quad (2.3)$$

$D(\mathbf{r}) \neq 0$  でないときに変位が場所により変化しており弹性体はひずんでいる。

ここで  $D$  を対称成分と反対称成分に分離する。 $\varepsilon = (D + D^T)/2$  および  $\varphi = (D - D^T)/2$  を用いて以下のように分離できる。

$$D = \varepsilon + \varphi. \quad (2.4)$$

$\varepsilon$  はひずみテンソルと呼ばれる対称行列であり、直交行列を使って対角化することができる。このように対角化したときの新しい座標軸は主軸と呼ばれこのときの  $\varepsilon$  の対角成分  $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}$  はひずみの主値と呼ばれる。対角和  $\text{Tr } \varepsilon$  は体積膨張率と一致し変形前の体積を  $V$ 、変形後の体積を  $V'$  とすると

$$\frac{V' - V}{V} \simeq \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = \text{div } \mathbf{u} = \text{Tr } \varepsilon. \quad (2.5)$$

一方で反対称テンソル  $\varphi$  は

$$\Omega' = \frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{u} \quad (2.6)$$

を用いて次のように書ける。

$$\varphi = \begin{pmatrix} 0 & -\Omega'_3 & \Omega'_2 \\ \Omega'_3 & 0 & -\Omega'_1 \\ -\Omega'_2 & \Omega'_1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (2.7)$$

このとき

$$\varphi \delta \mathbf{r} = \begin{pmatrix} \Omega'_2 \delta x_3 - \Omega'_3 \delta x_2 \\ \Omega'_3 \delta x_1 - \Omega'_1 \delta x_3 \\ \Omega'_1 \delta x_2 - \Omega'_2 \delta x_1 \end{pmatrix} = \boldsymbol{\Omega}' \times \delta \mathbf{r} \quad (2.8)$$

となり、これはベクトル  $\boldsymbol{\Omega}'$  まわりの回転を表す。

### 2.1.2 ひずみと応力

物体がひずんだときに物体の内部に働く力は応力と呼ばれる。これは以下で定義される応力テンソル  $\sigma_{ij}$  で表される。

$$\sigma_{ij} dS_j : j \text{ 軸に垂直な微小面 } dS_j \text{ に正の側からはたらく } i \text{ 方向の力.} \quad (2.9)$$

このとき微小体積要素  $dV$  に周囲から働く合力の  $i$  成分は次のように表される。

$$F_i dV = \sum_j \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} dV. \quad (2.10)$$

一般に弾性体に対してひずみと応力の関係は複雑であるが、ひずみテンソルが一様であるときには次の式が成り立つ。

$$\sigma_{ij} = \lambda(\operatorname{div} \mathbf{u}) \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}. \quad (2.11)$$

ここで  $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$  は応力テンソルであり、 $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$  はひずみの対称テンソル、 $\lambda, \mu$  はそれぞれラメ係数と呼ばれる量である。物体の弾性体としての性質はこのラメ係数を用いて表される。

例えば図 2.1 のように直方体の棒を  $x$  軸方向から単位面積あたりの力  $f$  で引っ張る場合を考える。

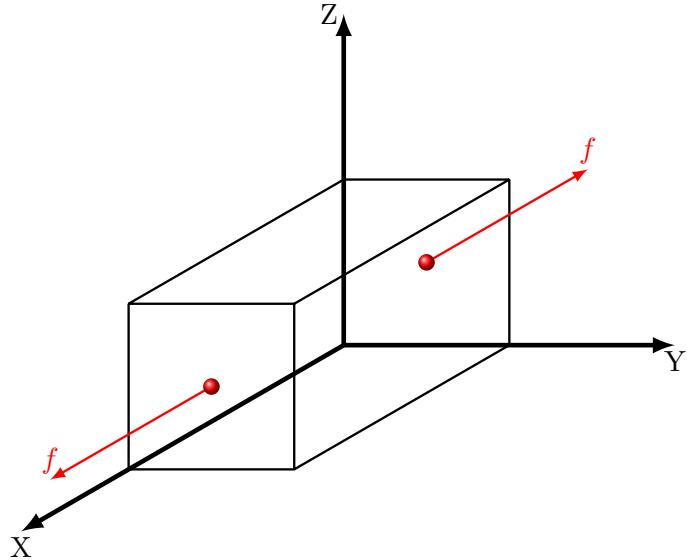


図 2.1 直方体を引っ張った模式図

このとき

$$x \text{ 方向: } f = \lambda(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + 2\mu \varepsilon_{11}. \quad (2.12)$$

$$y \text{ 方向: } 0 = \lambda(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + 2\mu \varepsilon_{22}. \quad (2.13)$$

$$z \text{ 方向: } 0 = \lambda(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) + 2\mu \varepsilon_{33}. \quad (2.14)$$

なお、それ以外の成分については  $\varepsilon_{ij} (i \neq j) = 0$  である。 $(2.12)(2.13)(2.14)$  を足すと

$$\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = \frac{f}{3\lambda + 2\mu}. \quad (2.15)$$

$$\varepsilon_{11} = \frac{\lambda + \mu}{\mu(3\lambda + 2\mu)} f, \quad \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} = -\frac{\lambda}{2\mu(3\lambda + 2\mu)} f. \quad (2.16)$$

これは  $x$  方向には引っ張った分だけ伸び、 $y, z$  方向には逆に縮むということを示している。ここでヤング率  $E$  及びポアソン比  $\nu$  が以下のように定義される。

$$E := \frac{f}{\varepsilon_{11}}, \quad \nu := -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} \left( = -\frac{\varepsilon_{33}}{\varepsilon_{11}} \right). \quad (2.17)$$

ヤング率  $E$  は引っ張るときの伸び率を表し、ポアソン比  $\nu$  は縦伸びに対する横縮みの比率を表す。 $(2.16)$  を代入するとこれらはラメ係数を用いて以下のように表される。

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}, \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}. \quad (2.18)$$

### 2.1.3 弹性体を伝わる波

弹性体の位置  $\mathbf{r}$  にある微小な体積要素  $dV$  の微小変位  $\mathbf{u}(\mathbf{r})$  の時間発展を考える。 $\mathbf{r}$  における質量密度を  $\rho(\mathbf{r})$  とすると Newton の運動方程式  $m\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{F}$  は  $(2.10)$  を考慮して次のように書き表される。

$$\rho(\mathbf{r}) \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \sum_k \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k}. \quad (2.19)$$

ここで  $(2.11)$  を  $(2.19)$  に代入する。そうすると

$$\sum_k \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = \lambda \frac{\partial}{\partial x_i} (\nabla \cdot \mathbf{u}) + 2\mu \sum_k \frac{\partial \varepsilon_{ik}}{\partial x_k}. \quad (2.20)$$

この最終項はさらに以下のように計算される。

$$\begin{aligned} \sum_k \frac{\partial \varepsilon_{ik}}{\partial x_k} &= \sum_k \frac{\partial}{\partial x_k} \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \\ &= \frac{1}{2} \left( \sum_k \frac{\partial^2}{\partial x_k^2} \right) u_i + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_k \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \\ &= \frac{1}{2} \nabla^2 u_i + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_i} (\nabla \cdot \mathbf{u}). \end{aligned} \quad (2.21)$$

$(2.21)$  を  $(2.20)$  に代入すると

$$\sum_k \frac{\partial \sigma_{ik}}{\partial x_k} = (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x_i} (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 u_i. \quad (2.22)$$

$(2.22)$  を  $(2.19)$  に代入することで以下の式が得られる。

$$\rho(\mathbf{r}) \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u}. \quad (2.23)$$

これはナビエの方程式と呼ばれる。

ここで無限等方媒質内の弾性平面波を考える。伝搬方向を  $x$  軸方向とすると  $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$  は  $x$  及び時間  $t$  の関数であり、

$$u_j(x, t) \quad j = x : \text{縦波}, \quad j = y, z : \text{横波}. \quad (2.24)$$

(2.24) を (2.23) に代入して整理すると

$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} - c_l^2 \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} = 0. \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} - c_t^2 \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} = 0. \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} - c_t^2 \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} = 0. \quad (2.27)$$

ここで

$$c_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad c_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.28)$$

であり、 $c_l > c_t$  であるので縦波の速度の方が速い。

横波においては  $\operatorname{div} \mathbf{u} = 0$  であり、物質の体積変化には関係しない。これに対して縦波では  $\operatorname{div} \mathbf{u} \neq 0$  であり物質内の圧縮や膨張に関係する。この互いに異なる速度で独立に伝搬する 2 つの波への分割はより一般の（必ずしも平面波ではない）無限空間内の弾性波の場合にも成り立つ。(2.23) を速度  $c_l, c_t$  をもって書き直してみると

$$\ddot{\mathbf{u}} = c_t^2 \nabla^2 \mathbf{u} + (c_l^2 - c_t^2) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{u}. \quad (2.29)$$

ここでベクトル  $\mathbf{u}$  を以下のように 2 つの部分に分解する。

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_l + \mathbf{u}_t. \quad (2.30)$$

ただしそれぞれ次のような条件を満足する。

$$\operatorname{div} \mathbf{u}_t = 0. \quad (2.31)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{u}_l = 0. \quad (2.32)$$

このような分解した表示はベクトル解析から常に可能である。(2.29) に  $\mathbf{u} = \mathbf{u}_t + \mathbf{u}_l$  を代入すると

$$\ddot{\mathbf{u}}_l + \ddot{\mathbf{u}}_t = c_l^2 \nabla^2 (\mathbf{u}_l + \mathbf{u}_t) + (c_l^2 - c_t^2) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{u}_l. \quad (2.33)$$

両辺の発散をとれば、 $\operatorname{div} \mathbf{u}_t = 0$  より

$$\operatorname{div} \ddot{\mathbf{u}}_l = c_l^2 \nabla^2 \operatorname{div} \mathbf{u}_l + (c_l^2 - c_t^2) \nabla^2 \operatorname{div} \mathbf{u}_l. \quad (2.34)$$

整理して

$$\operatorname{div} (\ddot{\mathbf{u}}_l - c_l^2 \nabla^2 \mathbf{u}_l) = 0. \quad (2.35)$$

一方で、この表式の括弧内の  $\operatorname{rot}$  をとれば (2.32) によって 0 となる。あるベクトルの  $\operatorname{rot}$  および  $\operatorname{div}$  が全空間で 0 となるときはこのベクトルは定数を除いて恒等的に 0 となる。よって

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}_l}{\partial t^2} - c_l^2 \nabla^2 \mathbf{u}_l = 0. \quad (2.36)$$

同様に (2.33) の rot とすると、 $\text{rot } \mathbf{u}_l = 0$  および  $\text{rot grad} = 0$  であるので

$$\text{rot}(\ddot{\mathbf{u}}_t - c_t^2 \nabla^2 \mathbf{u}_t) = 0 \quad (2.37)$$

が得られる。また上の括弧内の式の div もまた 0 であるから (2.36) と同じような方程式が得られ、

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}_t}{\partial t^2} - c_t^2 \nabla^2 \mathbf{u}_t = 0. \quad (2.38)$$

方程式 (2.36) および (2.38) は三次元の波動方程式である。これらはそれぞれ速度  $c_l$  および  $c_t$  をもつ弾性波の伝播を表している。波  $\mathbf{u}_t$  は体積変化に関係しないが ( $\text{div } \mathbf{u}_t = 0$ )、波  $\mathbf{u}_l$  は体積の圧縮や膨張を伴う。

#### 2.1.4 Rayleigh 波

ここからは物体表面付近で伝播し、深部に達しない波である SAW について考える。SAW の中でも変位ベクトル  $\mathbf{u}$  が表面に対して垂直で伝搬方向を通って引かれる平面内に横たわる波を Rayleigh 型表面弾性波 (R-SAW) という。

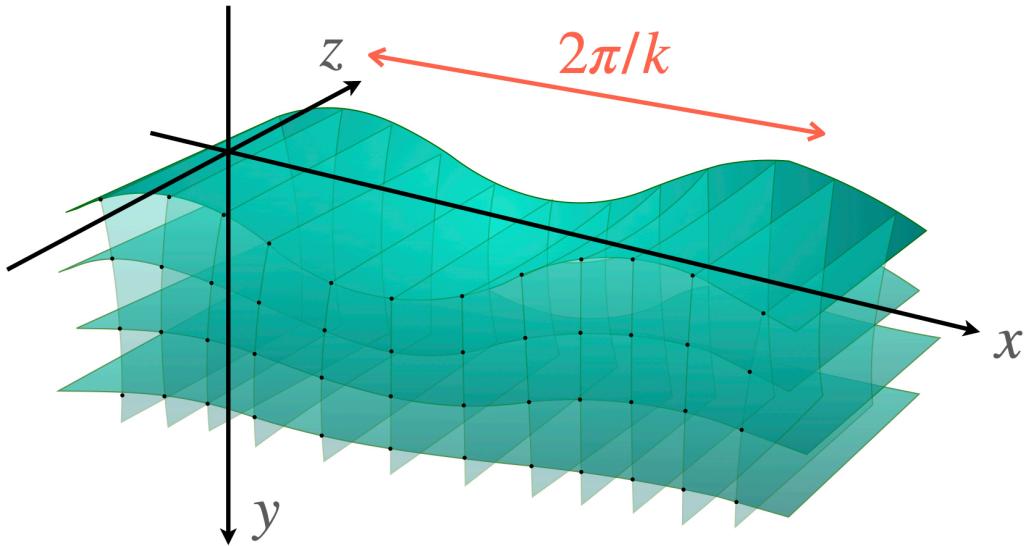


図 2.2 Rayleigh 型表面弾性波

(2.36) および (2.38) の形の波動方程式をまとめて

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 u = 0. \quad (2.39)$$

と書いておく。ここに  $u$  はベクトル  $\mathbf{u}_l, \mathbf{u}_t$  のある成分であり、 $c$  は対応する速度  $c_l$  または  $c_t$  である。

以下図 2.2 のように R-SAW の座標軸を取った状況を仮定する。弾性媒質の表面は無限平面と仮定し、この平面を  $xz$  平面としてとり、媒質は  $y < 0$  に渡って広がっているとする。

ここで  $x$  軸に沿って伝わっていく平面単色の表面波を考える。すなわち  $u$  として

$$u = e^{i(kx - \omega t)} f(y) \quad (2.40)$$

という形を仮定する。そこで (2.40) を (2.39) に代入すれば関数  $f(y)$  に対して次の方程式が得られる。

$$\frac{d^2f}{dy^2} = \left( k^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \right) f. \quad (2.41)$$

$k^2 - \omega^2/c^2 < 0$  であるならば関数  $f$  として周期関数を与えててしまうことになり、物質の内部で決して減衰することのない平面波が得られてしまう。故に  $k^2 - \omega^2/c^2 > 0$  であると仮定する。このとき解  $f$  は次のような形を取る。

$$f(y) = \text{const } \exp \left( \pm y \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c^2}} \right). \quad (2.42)$$

負符号の解は  $y \rightarrow -\infty$  にしたがってとどめなく増大してしまう解に対応し不適であるので結局解としては次のような形になる。

$$u = \text{const } e^{i(kx - \omega t)} e^{\kappa y}. \quad (2.43)$$

ここで

$$\kappa = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c^2}}. \quad (2.44)$$

は減衰定数である。これは物体内部に向かって指数関数的に減衰する波を表しており、表面付近を伝播する波となっている。

実際の変位ベクトル  $\mathbf{u}$  はベクトル  $\mathbf{u}_t$  と  $\mathbf{u}_l$  の和になっており、それぞれの成分は (2.39) で  $\mathbf{u}_l$  に対しては速度  $c = c_l$  、  $\mathbf{u}_t$  に対しては  $c = c_t$  とおいた方程式を満足する。無限媒質内の体積波の場合にはこれら 2 つの部分は独立に伝播していくが、表面波の場合には境界条件が存在するために独立ではなくなる。

実際の変位ベクトル  $\mathbf{u}$  を与える  $\mathbf{u}_l$  と  $\mathbf{u}_t$  の線型結合の係数を決定づけるためには物体表面の境界条件を考える必要があり、これより波数ベクトル  $\mathbf{k}$  と周波数  $\omega$  との分散関係が決定され、したがって波の伝搬速度が決定される。自由境界上では  $\sigma_{ik}n_k = 0$  という条件が成立しなければならない。境界の法線ベクトル  $\mathbf{n}$  は  $y$  軸に平行であるから

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yy} = \sigma_{zy} = 0. \quad (2.45)$$

(2.11) より

$$\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} = 0. \quad (2.46)$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} = 0. \quad (2.47)$$

$$\nu \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + (1 - \nu) \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0. \quad (2.48)$$

$u_{ij}$  のすべての値は  $z$  に依存しないので (2.47) より

$$\frac{\partial u_z}{\partial y} = 0. \quad (2.49)$$

(2.43) を用いて次のような結論を得る。

$$u_z = 0 \quad (2.50)$$

このように表面波における変形ベクトル  $\mathbf{u}$  は表面に対して垂直で伝播方向を通って引かれる平面内に横たわる。

横波部分  $\mathbf{u}_t$  は条件 (2.31) すなわち

$$\frac{\partial u_{tx}}{\partial x} + \frac{\partial u_{ty}}{\partial y} = 0 \quad (2.51)$$

を満足せねばならない。 $u_{tx}, u_{ty}$  の  $x, y$  依存性は因子  $\exp(ikx + \kappa_t y)$  によって決定される。ここで  $\kappa_t$  は  $c = c_t$  とした (2.44)、すなわち

$$\kappa_t = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c_t^2}} \quad (2.52)$$

によって与えられる。故に (2.51) は次の等式を導く

$$iku_{tx} + \kappa_t u_{ty} = 0. \quad (2.53)$$

もしくは変形して

$$\frac{u_{tx}}{u_{ty}} = -\frac{\kappa_t}{ik}. \quad (2.54)$$

よって  $a$  をある定数として

$$u_{tx} = \kappa_t a \exp(ikx + \kappa_t y - i\omega t), \quad u_{ty} = -ika \exp(ikx + \kappa_t y - i\omega t). \quad (2.55)$$

縦波部分  $\mathbf{u}_l$  は条件 (2.32) すなわち

$$\frac{\partial u_{lx}}{\partial y} - \frac{\partial u_{ly}}{\partial x} = 0. \quad (2.56)$$

を満足する。したがって

$$iku_{ly} - \kappa_l u_{lx} = 0, \quad \left( \kappa_l = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c_l^2}} \right). \quad (2.57)$$

よって  $b$  を定数として以下の表式を得る。

$$u_{lx} = kb \exp(ikx + \kappa_l y - i\omega t), \quad u_{ly} = -i\kappa_l b \exp(ikx + \kappa_l y - i\omega t). \quad (2.58)$$

続いて (2.46), (2.48) を用いる。これらを速度  $c_l$  と  $c_t$  を導入して書き換える。(2.28) と (2.18) から

$$\nu = \frac{c_l^2 - 2c_t^2}{2(c_l^2 - c_t^2)} \quad (2.59)$$

であるので

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} = 0. \quad (2.60)$$

$$c_l^2 \frac{\partial u_y}{\partial y} + (c_l^2 - 2c_t^2) \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0. \quad (2.61)$$

ここで

$$u_x = u_{lx} + u_{tx}, \quad u_y = u_{ly} + u_{ty} \quad (2.62)$$

と置くことができるから (2.60) より境界  $y = 0$  での条件であることに注意して

$$a(k^2 + \kappa_t^2) + 2bk\kappa_l = 0. \quad (2.63)$$

同様に (2.61) から以下の式を得る。

$$2ac_t^2\kappa_t k + b [c_l^2(\kappa_l^2 - k^2) + 2c_t^2k^2] = 0. \quad (2.64)$$

この式を  $c_t^2$  で割ってさらに

$$\kappa_l^2 - k^2 = -\frac{\omega^2}{c_l^2} = -(k^2 - \kappa_t^2) \frac{c_t^2}{c_l^2} \quad (2.65)$$

を代入すると次のような形に書くことができる。

$$2a\kappa_t k + b(k^2 + \kappa_t^2) = 0. \quad (2.66)$$

$a, b$  についての同時方程式系 (2.63), (2.66) が非自明な解を持つための条件は

$$(k^2 + \kappa_t^2)^2 = 4k^2 \kappa_t \kappa_l. \quad (2.67)$$

両辺の平方をとって  $\kappa_t^2, \kappa_l^2$  の値の置き換えを行えば

$$\left(2k^2 - \frac{\omega^2}{c_t^2}\right)^4 = 16k^4 \left(k^2 - \frac{\omega^2}{c_t^2}\right) \left(k^2 - \frac{\omega^2}{c_l^2}\right). \quad (2.68)$$

この方程式から  $\omega$  と  $k$  の関係が定まる。ここで  $\xi$  という無次元量を導入して次のように置くと便利である。

$$\omega = c_t k \xi. \quad (2.69)$$

そうすると、この方程式系の両辺の  $k^8$  の項はキャンセルされ、展開すると結局次のような  $\xi$  の代数方程式が得られる。

$$\xi^6 - 8\xi^4 + 8\xi^2 \left(3 - 2\frac{c_t^2}{c_l^2}\right) - 16 \left(1 - \frac{c_t^2}{c_l^2}\right) = 0. \quad (2.70)$$

ここからわかる重要なことは  $\xi$  が  $c_t/c_l$  という比の値だけに依存し、これはある与えられた物質に対して一定であり、言い換えればポアソン係数だけに依存するという特徴を持つことである。すなわち

$$\frac{c_t}{c_l} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}}. \quad (2.71)$$

$\xi$  はもちろん正の実数値をとり、 $\kappa_t, \kappa_l$  が実数であるために  $\xi < 1$  である。方程式 (2.70) はそのような条件を満たす根を唯一つ持ち、したがって与えられた  $c_t/c_l$  に対して  $\xi$  の値はただ一つしか得られる。

以上より表面波でも体積波でも周波数は波数ベクトルの大きさ  $k$  に比例し、その比例係数  $U$  は波の伝搬速度であり

$$U = c_t \xi. \quad (2.72)$$

これは表面弾性波 (SAW) の伝播速度であり、体積波の横波および縦波速度  $c_l, c_t$  によって与えられる。横波部分と縦波部分の振幅比は (2.66) に  $\kappa_t^2 = k^2 - \omega^2/c_t^2 = k^2(1 - \xi^2)$  を代入すると ( $k > 0$  であることに注意して) 以下のように与えられる。

$$\frac{a}{b} = -\frac{2 - \xi^2}{2\sqrt{1 - \xi^2}}. \quad (2.73)$$

比  $c_t/c_l$  は材料に依存して変化し、 $\nu$  が 0 から  $1/2$  まで変化することに対応して  $1/\sqrt{2}$  から 0 までの間を変化する。 $\xi$  はこのとき 0.824 から 0.955 まで変化する [9]。 $\xi$  の  $\nu$  に関する関数形は図 2.3 のようになる。

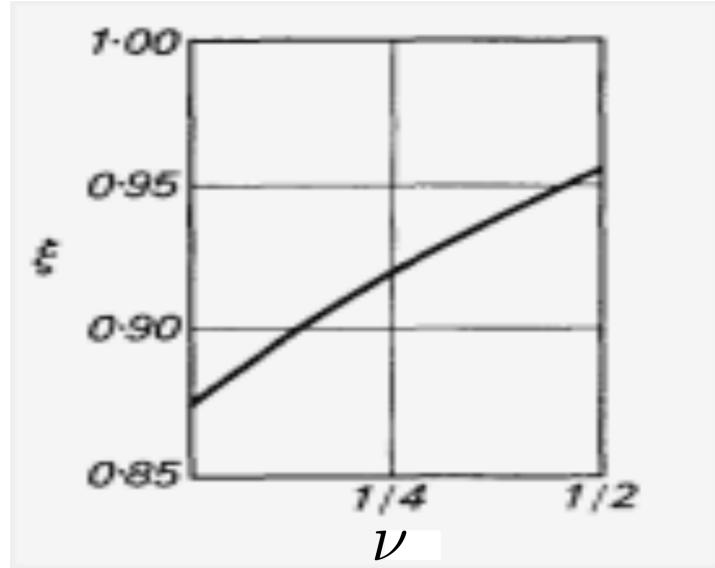


図 2.3  $\xi$  の  $\nu$  依存性 ([9] より引用)

以上まとめて (2.55)(2.58)(2.73) から結局、格子変位  $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$  は以下のように計算できる。

$$u_x = u_0 \left( -\sqrt{1-\xi^2} \exp(ikx + \kappa_t y - i\omega t) + \frac{2\sqrt{1-\xi^2}}{2-\xi^2} \exp(ikx + \kappa_l y - i\omega t) \right). \quad (2.74)$$

$$u_y = iu_0 \left( \exp(ikx + \kappa_t y - i\omega t) - \frac{2\sqrt{1-\xi^2}\sqrt{1-\xi^2(c_t^2/c_l^2)}}{2-\xi^2} \exp(ikx + \kappa_l y - i\omega t) \right). \quad (2.75)$$

$$u_z = 0. \quad (2.76)$$

ここで  $u_0$  は対応する振幅であり、これらの一番目の項が横波に対応し、二番目の項が縦波である。

## 2.2 スピン渦度結合によるスピン流生成

### 2.2.1 スピン流

金属中には高い密度の伝導電子がいて自由電子は物質中を高速で運動している。この伝導電子系に電場を与えると、電子の集団はある方向に流れることになり、これが電流である。このとき通常の磁性を持たない金属ではスピンの向きはランダムに分布しているのでスピンの流れは全体で打ち消されている。一方で例えばアップスピンの電子とダウンスピンの電子が同数でそれぞれ逆向きに運動している場合を考えると、これは電荷の流れとしては打ち消しあっていって正味の電流は 0 である。一方でスピンの流れは打ち消されずに残る。このようなスピン角運動量の流れをスピン流といい、特に上記の例のように電流が 0 でスピン流だけが流れている状態を純スピン流状態という(図 2.4)。スピンの  $z$  成分が良い量子数の場合スピン流の  $z$  成分は  $z$  方向に平行なスピンを持つ電流  $j_{\uparrow}$  と  $z$  方向に反平行なスピンをもつ電流  $j_{\downarrow}$  の差で表現され

$$\mathbf{J}_s = -\frac{\hbar}{2e} (\mathbf{j}_{\uparrow} - \mathbf{j}_{\downarrow}). \quad (2.77)$$

ここで  $e > 0$  は電気素量である。一方で電流は

$$\mathbf{J}_c = \mathbf{j}_{\uparrow} + \mathbf{j}_{\downarrow}. \quad (2.78)$$

と書ける。スピン流と電流の決定的な違いは電流が一般に保存流であることに対してスピン流は保存流でないということである。電荷保存則によって電流は保存流であるが、スピンに対しては保存則はなく、例えば SOI によってある確率で自然にスピンの向きが無秩序に変化してしまう。その結果電子スピン流はある程度の距離を流れると消えてしまう。この距離をスピン拡散長とよび、通常の金属では長くともマイクロメートルスケールである。

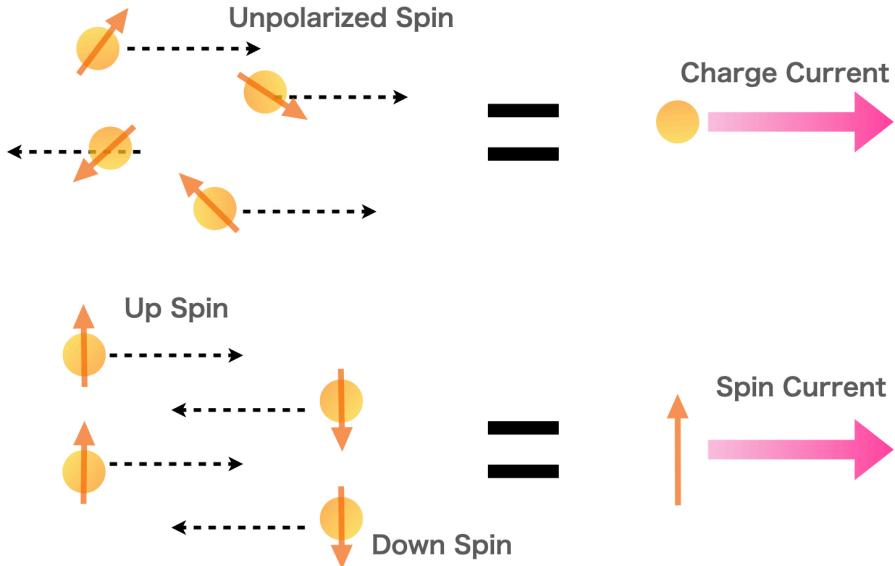


図 2.4 伝導電子の運ぶ電流 (上図) とスピン流 (下図)

## 2.2.2 スピン蓄積

空間的に非一様なスピン密度があると拡散スピン流が流れる。また電場  $\mathbf{E}$  をかけるとドリフトスピン流が流れる。まずスピン自由度を考慮しないで考えると電流密度  $\mathbf{j}$  はドリフト流  $\mathbf{j}_{\text{drift}}$  と拡散流  $\mathbf{j}_{\text{diffusion}}$  の和、 $\mathbf{j} = \mathbf{j}_{\text{drift}} + \mathbf{j}_{\text{diffusion}}$  で以下のように書かれる

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} + eD\nabla n. \quad (2.79)$$

ここで  $\sigma$  は電気伝導度であり、 $D$  は拡散係数、 $n$  は粒子数密度である。 $\mathbf{j}_{\text{drift}} = \sigma \mathbf{E}$  で  $\mathbf{j}_{\text{diffusion}} = eD\nabla$  であり、フェルミエネルギー  $E_F$  での状態密度を  $N(E_F)$  と書くと 化学ポテンシャル  $\mu^c$  と粒子数密度には

$$N(E_F)\nabla\mu^c = \nabla n \quad (2.80)$$

の関係が成り立ち、電気化学ポテンシャル  $\phi$  を電位  $\phi$  と化学ポテンシャル  $\mu^c$  を用いて  $\mu := \mu^c - e\phi$  のように定義するとその勾配は

$$\nabla\mu = e\mathbf{E} + \frac{\nabla n}{N(E_F)}. \quad (2.81)$$

したがって  $\nabla\mu = 0$  のとき電流密度

$$\mathbf{j} = (\sigma - e^2 N(E_F) D) \mathbf{E} \quad (2.82)$$

が 0 であるとすれば以下の Einstein の関係式が得られる。

$$\sigma = e^2 N(E_F) D. \quad (2.83)$$

(2.81) と (2.83) から次のようになる。

$$\mathbf{j} = \frac{\sigma}{e} \nabla \mu. \quad (2.84)$$

この関係式は電気化学ポテンシャルの勾配  $\nabla \mu$  が電流の駆動力となっていることを示している。ここでスピンの自由度を再び考える。スピン流の駆動力となるのはスピン依存した電気化学ポテンシャル  $\mu_\sigma$  の勾配のアップスピン ( $\sigma = \uparrow$ ) とダウنسピン ( $\sigma = \downarrow$ ) の差である。スピン依存した電流密度  $j_\sigma$  は以下のように表される。

$$j_\sigma = \frac{\sigma}{e} \nabla \mu_\sigma. \quad (2.85)$$

ここで  $\mu_\sigma = \mu_\sigma^c - e\phi$  はスピン依存電気化学ポテンシャルである。電流とスピン流は (2.77)、(2.78) より

$$\mathbf{J}_c = \frac{1}{e} \nabla (\sigma_\uparrow \mu_\uparrow + \sigma_\downarrow \mu_\downarrow). \quad (2.86)$$

$$\mathbf{J}_s = -\frac{\hbar}{2e^2} \nabla (\sigma_\uparrow \mu_\uparrow - \sigma_\downarrow \mu_\downarrow). \quad (2.87)$$

特に非磁性体内では  $\sigma_\uparrow = \sigma_\downarrow = \sigma$  なのでスピン流  $\mathbf{J}_s$  は

$$\mathbf{J}_s = -\frac{\hbar\sigma}{2e^2} \nabla (\mu_\uparrow - \mu_\downarrow) = -\frac{\hbar\sigma}{2e^2} \nabla \delta\mu. \quad (2.88)$$

ここに  $\delta\mu := \mu_\uparrow - \mu_\downarrow$  はスピン蓄積とよばれ、スピン流を流すためのポテンシャルとなっている。

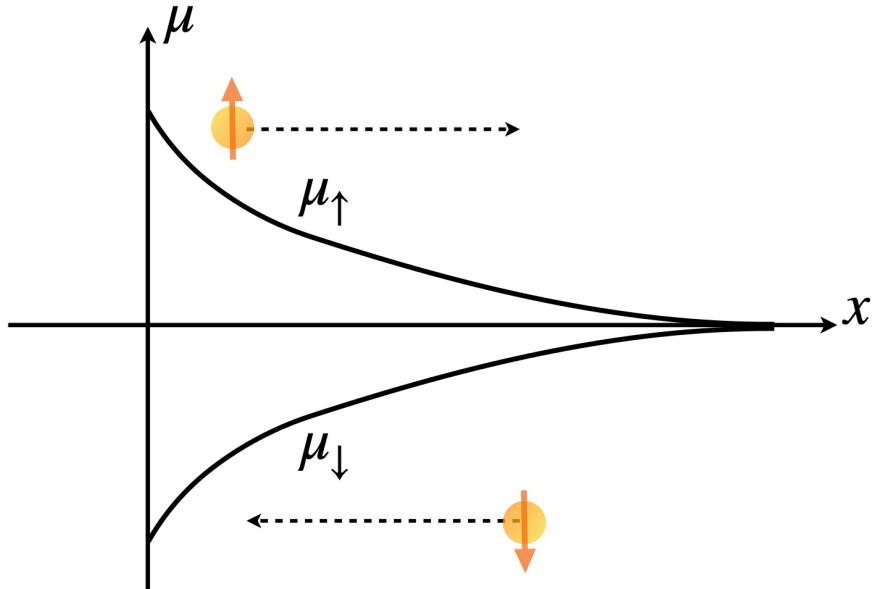


図 2.5 スピン流とスピン蓄積

### 2.2.3 スピン渦度結合

スピン渦度結合 (SVC) とはスピン角運動量と格子回転による渦度の結合でありハミルトニアンは

$$H_{SVC} = -\mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\Omega} = -\frac{\hbar}{2} \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\Omega} \quad (2.89)$$

で与えられる。SVC の起源は強磁性体における Einstein-de Haas 効果および Barnett 効果にあり、それぞれ強磁性体を磁化させるとそれに応じて回転する効果およびその逆効果である強磁性体を回転させると磁化する効果である。Barnett 効果では強磁性体に見かけの有効磁場である Barnett 磁場  $\mathbf{h}_B$  が生じると考えられ、その大きさは剛体回転の角速度  $\boldsymbol{\Omega}$  を後述する磁気回転比  $\gamma$  で割った値

$$\mathbf{h}_B = \frac{\boldsymbol{\Omega}}{\gamma} \quad (2.90)$$

で与えられる。すなわち力学的回転  $\boldsymbol{\Omega}$  はその回転軸方向の有効磁場  $\mathbf{h}_B$  と等価である。

上記の磁気回転効果を強磁性体から非磁性体へ、そして剛体回転から弾性体の格子回転を利用した局所的な渦度へ拡張した理論が SVC である。この局所的な渦度中の電子の運動、すなわち非一様な加速度系での電子の運動を考えるにあたって一般共変な Dirac 方程式を考える必要がある。曲がった時空間でのスピン  $1/2$  の粒子を記述するそのような基礎方程式は

$$[i\gamma^\mu(p_\mu + eA_\mu - i\hbar\Gamma_\mu) + mc]\Psi = 0. \quad (2.91)$$

ここで  $c$  は光速で  $\hbar$  はプランク定数、 $m$  は電子の質量である。 $A_\mu$  は U(1) ゲージポテンシャルであり、 $\Gamma_\mu$  はスピン接続とよばれる量であり、計量  $g_{\mu\nu}(x)$  によって決められる。座標依存した Clifford 代数として  $\gamma^\mu = \gamma^\mu(x)$  において、

$$\{\gamma^\mu(x), \gamma^\nu(x)\} = 2g^{\mu\nu}(x), \quad (\mu, \nu = 0, 1, 2, 3) \quad (2.92)$$

が成り立つ。以下では格子変形がつくる速度場  $\mathbf{v} = \dot{\mathbf{u}}$  のもとでの一電子について考える。この速度場  $\mathbf{v}$  がゲージポテンシャル  $\Gamma_\mu$  の源になる。ここで  $|\mathbf{v}| \ll c$  であると仮定する。格子変形速度場の局所静止系から慣性系への座標変換は  $d\mathbf{r}' = d\mathbf{r} + \mathbf{v}(x)dt$  となり、世界線素  $ds$  は

$$ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu = (-c^2 + \mathbf{v}^2)dt^2 + 2\mathbf{v} \cdot d\mathbf{r}dt + d\mathbf{r}^2. \quad (2.93)$$

このとき計量は

$$g_{00} = -1 + \frac{v^2}{c^2}, \quad g_{0i} = g_{i0} = \frac{v_i}{c}, \quad g_{ij} = \delta_{ij}. \quad (2.94)$$

(2.91)、(2.94) から局所静止系での Dirac ハミルトニアンが導かれ次のようにになる。[10]

$$H = \beta mc^2 + c\boldsymbol{\alpha} \cdot \boldsymbol{\pi} - eA_0 + \frac{1}{2}e\mathbf{A} \cdot \mathbf{v} - \frac{1}{2}\{\mathbf{v}, \boldsymbol{\pi}\} - \frac{1}{2}\boldsymbol{\Sigma} \cdot \boldsymbol{\omega}. \quad (2.95)$$

ここで  $\beta, \boldsymbol{\alpha}$  は Dirac 行列  $\gamma^\mu$  と  $\gamma^0(x) = i\beta, \gamma^j(x) = i\beta\alpha_j$  の関係があり以下のように表される。

$$\beta = \begin{pmatrix} I & O \\ O & -I \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{\alpha} = \begin{pmatrix} O & \boldsymbol{\sigma} \\ \boldsymbol{\sigma} & O \end{pmatrix}. \quad (2.96)$$

ここに  $I$  は単位行列で  $O$  は零行列、 $\boldsymbol{\sigma}$  はパウリ行列である。

また  $\boldsymbol{\Sigma}$  はスピン演算子であり、

$$\Sigma_{ij} = \frac{1}{2}\varepsilon_{ijk} \begin{pmatrix} \sigma_k & O \\ O & \sigma_k \end{pmatrix}. \quad (2.97)$$

さらに  $\boldsymbol{\pi}$  は運動量  $\mathbf{p}$  と U(1) ゲージ場  $\mathbf{A}$  を用いて  $\boldsymbol{\pi} = \mathbf{p} + e\mathbf{A}$  と表される。また  $\boldsymbol{\omega}$  は

$$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{v} \quad (2.98)$$

で表される渦度と呼ばれる量である。(2.95) の最終項  $\boldsymbol{\Sigma} \cdot \boldsymbol{\omega}/2$  が SVC ハミルトニアン  $H_{SVC}$  である。ここで  $\mathbf{v}$  がある定数ベクトル  $\boldsymbol{\Omega}$  を用いて

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r} \quad (2.99)$$

と書かれている場合を考える。(2.6)、(2.8)で考えた格子変位  $\mathbf{u}$  を速度場  $\mathbf{v}$  で置き換えて考える  
と渦度  $\boldsymbol{\omega}$  と角速度  $\boldsymbol{\Omega}$  の間には

$$\boldsymbol{\omega} = 2\boldsymbol{\Omega} \quad (2.100)$$

の関係が成立する。このようなとき (2.95) の  $-\{\mathbf{v}, \boldsymbol{\pi}\}/2$  は回転と軌道角運動量とのカップリング  
を表す式  $-\boldsymbol{\Omega} \cdot (\mathbf{r} \times \boldsymbol{\pi})$  になり、また最終項の SVC の項はスピン回転結合の形で  $-\boldsymbol{\Sigma} \cdot \boldsymbol{\Omega}$  となり、  
回転座標系での Dirac ハミルトニアンの表式

$$H = \beta mc^2 + c\boldsymbol{\alpha} \cdot \boldsymbol{\pi} - (\mathbf{r} \times \boldsymbol{\pi}) \cdot \boldsymbol{\Omega} - eA_0 - \boldsymbol{\Sigma} \cdot \boldsymbol{\Omega} \quad (2.101)$$

が得られる。この回転系の Dirac 方程式から陽電子の自由度を消去した電子の低エネルギー有効理  
論を求めるとき  $1/m$  のオーダーで

$$H_e^{(1/m)} = \frac{\boldsymbol{\pi}^2}{2m} - eA_0 - (\mathbf{r} \times \boldsymbol{\pi}) \cdot \boldsymbol{\Omega} - \frac{e\hbar}{2m} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{B} - \frac{\hbar}{2} \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\Omega} \quad (2.102)$$

となり、運動項や Coriolis 項および Zeeman 項に加えてやはり最終項にはスピン回転結合が残る。  
このスピン回転結合の項を Zeeman 項に押し込むと

$$H_e^{(1/m)} = \frac{\boldsymbol{\pi}^2}{2m} - eA_0 - (\mathbf{r} \times \boldsymbol{\pi}) \cdot \boldsymbol{\Omega} - \frac{e\hbar}{2m} \boldsymbol{\sigma} \cdot (\mathbf{B} + \mu_0 \mathbf{h}_B) \quad (2.103)$$

が得られ、(2.90) で表される Barnett 磁場が現れる。ここで  $\mu_0$  は真空の透磁率である。

この SVC によるスピン流生成機構は Stern-Gerlach の実験と同様な原理で説明される。Stern-Gerlach の実験では磁場勾配にそってアップスピンとダウンスピンが分裂し、スピン流をつくる。  
本実験では表面弹性波の渦度が膜厚方向に減衰していくことを利用して渦度勾配、すなわち SVC  
による有効磁場の勾配を作り出し、スピン流を生成した。ただし Stern-Gerlach の実験と異なるのは、  
SVC による渦度勾配は時間的にも空間的にも周期的に変化する交流であるので、生成するス  
ピン流も交流スピン流となる点である。

## 2.2.4 スピン渦度結合によるスピン流生成

スピン渦度結合 (SVC) によるスピン流生成を記述するスピン拡散方程式を導く。

格子の力学的回転運動の角周波数である  $\boldsymbol{\Omega}$  は (2.98)、(2.100) により

$$\boldsymbol{\Omega} = \frac{1}{2} \nabla \times \dot{\mathbf{u}} \quad (2.104)$$

と表される。ここで (2.31)(2.32) より格子回転が横波を持つ場合に (2.104) は消えずに残ることが  
わかる。ここで 2.1.4 節と同様の設定で  $x$  方向に伝播して  $y$  方向に減衰する  $xz$  平面内を伝播する  
表面弹性波を考える。

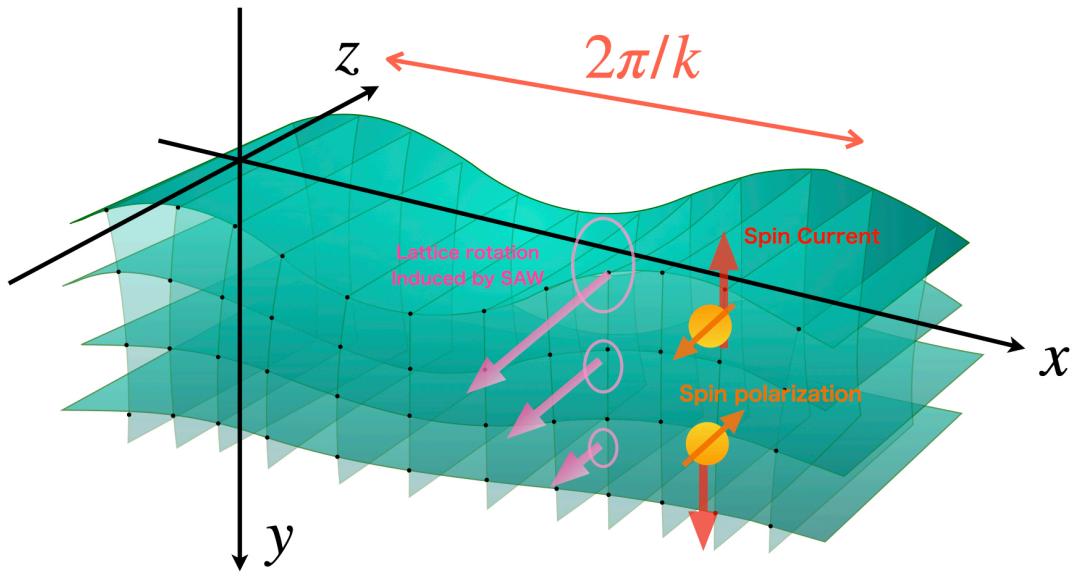


図 2.6 SAW によるスピン流生成

このとき  $\Omega = (0, 0, \Omega)$  のようになり、 $\Omega$  は (2.74)(2.75)(2.76) より次のように計算される。

$$\Omega(x, y, t) = \frac{\omega^2 u_0}{2c_t} \exp [-\kappa_t y + i(kx - \omega t)]. \quad (2.105)$$

ただしここで  $u_0\xi$  を改めて  $u_0$  と置き直した。このように  $z$  軸方向の力学的回転  $\Omega$  が与えられたとき、SVC ハミルトニアン (2.89) によりスピンは回転軸方向 ( $\pm z$ ) に平行にそろう。このときに生じたスピン蓄積が拡散してスピン流となる。

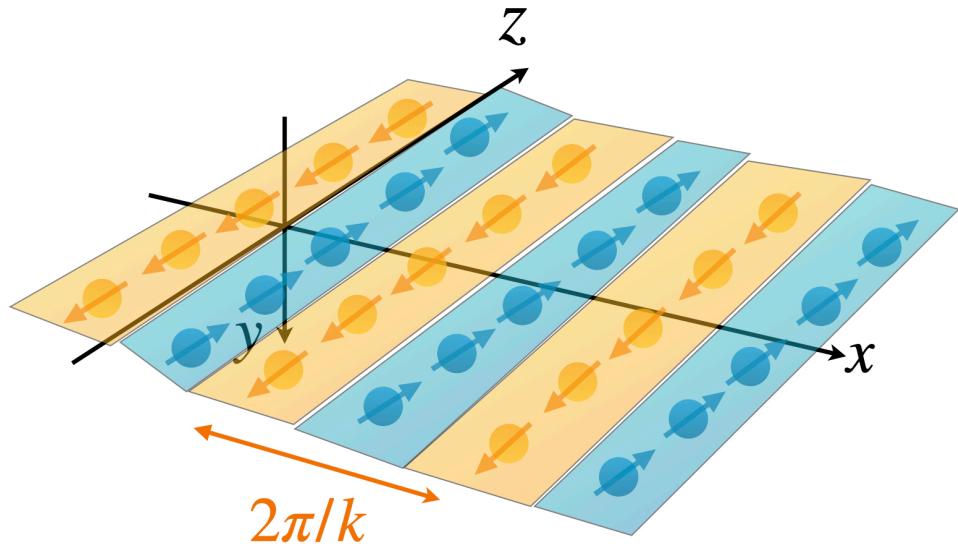


図 2.7 表面に生じたスピン蓄積

SVC ハミルトニアン (2.89) により、電子のエネルギー-band の底は  $\hbar\Omega/2$  だけ変化する。

アップ(ダウン)スピンの電子数密度  $n_{\uparrow(\downarrow)}$  は次のように与えられる。

$$n_{\uparrow(\downarrow)} = \int_{\pm \hbar\Omega/2}^{\mu_{\uparrow(\downarrow)}} d\varepsilon N_0(\varepsilon). \quad (2.106)$$

ここで  $N_0$  は電子の状態密度であり、 $\mu_{\uparrow(\downarrow)}$  はアップ(ダウン)スピンの化学ポテンシャルである。簡単のため状態密度を定数として考えるとこのときのスピン密度は次のように評価される。

$$n_{\uparrow} - n_{\downarrow} \simeq N_0(\delta\mu - \hbar\Omega). \quad (2.107)$$

ここに  $\delta\mu = \mu_{\uparrow} - \mu_{\downarrow}$  は (2.88) で定義したスピン蓄積である。スピンは緩和がおこり、スピン緩和時間  $\tau_{sf}$  および拡散定数  $D$  を用いてこのスピン緩和のプロセスは次のように表される

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_{\uparrow} - n_{\downarrow}) = \frac{1}{\tau_{sf}}N_0\delta\mu + D\nabla^2(N_0\delta\mu). \quad (2.108)$$

(2.107)(2.108) より SVC を含んだスピン拡散方程式

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} - D\nabla^2 + \frac{1}{\tau_{sf}} \right) \delta\mu = \hbar \frac{\partial\Omega}{\partial t} \quad (2.109)$$

が得られる。(2.109) の右辺が SVC 由来のスピン蓄積  $\delta\mu$  の source 項であり、力学的回転の時間微分すなわち渦度の時間微分に比例する。スピン流の生成にはもうひとつの機構が提唱されており、Takahashi らは液体 Hg の流体運動による定常的な渦度から生成されるスピン流を観測し、渦度自体に比例するスピン流生成機構を実験的に検証した [18]。この方法でのスピン流生成は後に Matuo らによって理論的な説明がなされており結局 SVC 由来のスpin拡散方程式 (2.109) は次のように拡張される [8, 10]。

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} - D\nabla^2 + \frac{1}{\tau_{sf}} \right) \delta\mu = \hbar \frac{\partial\Omega}{\partial t} - \frac{\hbar}{\tau_{sf}}\zeta\Omega. \quad (2.110)$$

ここで  $\zeta$  は力学的回転とスピンとの変換効率を表す規格化因子である。ここに  $\Omega$  の表式 (2.105) を代入して方程式を解き、得られたスピン蓄積から (2.88) を計算すると  $z$  方向に偏極した交流スピン流  $J_s$  が次のように求まる [6, 8, 11]。

$$J_s = (\tau_{sf}\omega - i\zeta) J'_s e^{i(kx - \omega t)} := (J_s^{\tau_{sf}} - iJ_s^{\zeta}) e^{i(kx - \omega t)}. \quad (2.111)$$

ここで  $\kappa_t y \ll 1$  という表面付近のスピン流を考えるとすれば、 $J'_s$  は  $y$  に比例した形で次のように与えられる。

$$J'_s \simeq -\frac{\hbar^2\sigma\omega^3u_0}{2e^2c_t^2} \left( 1 + \frac{\kappa_t^2\lambda_s^2}{1 - \xi^2} \right)^{-1/4} \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} \frac{y}{\lambda_s}. \quad (2.112)$$

ここに  $\lambda_s = \sqrt{D\tau_{sf}}$  はスピン拡散長であり、 $\sigma$  は電気伝導度である。(2.111) から見て取れるように、生成されるスピン流は  $J_s^{\tau_{sf}}$  と記した  $\tau_{sf}$  に比例する項と、 $J_s^{\zeta}$  と記した  $\zeta$  に比例する項がありそれぞれ (2.110) の渦度の時間微分と渦度に比例する項である。もしも前者の機構が支配的であるとすれば、これは  $\tau_{sf}$  に比例するためにスピン軌道相互作用 (SOI) が弱く、散乱が起こりにくい材料がスピン流生成に有利であることを表している。一方で後者の機構の  $\zeta$  に比例するスピン流生成の SOI の寄与についてははっきりとわかっていない。さらに (2.111)(2.112) から SVC 由来のスピン流強度は角周波数  $\omega$  の 3 乗ないしは 4 乗に比例するということがわかる。すなわち高い周波数の波を励起するほど、より高いスピン流強度が得られることを示している。

## 2.3 磁気共鳴

SVC によって生成した спин流が強磁性体に流れ込むと後述するスピントランスマートルクによりスピントラス波が励起される。本実験ではここに外部磁場をかけて磁気共鳴を起こすことでスピントラス波を検出した。

### 2.3.1 LLG 方程式

原子の磁気モーメント  $\mu$  は原子の角運動量  $L$  に比例し平行もしくは反平行になる。電子の場合には反平行となり

$$\mu = -\gamma L \quad (2.113)$$

と書かれる。ここで  $\gamma$  は磁気回転比と呼ばれる量であり、

$$\gamma = \frac{g\mu_0 e}{2m} \quad (2.114)$$

で表される。ここに  $g > 0$  は  $g$  因子であり電子スピンの場合ほぼ 2 である。 $\mu_0$  は真空の透磁率、 $e > 0$  は電気素量、 $m$  は電子の質量である。磁気モーメント  $m$  が外部磁場  $H$  の中にあるとき、トルク

$$T = \mu \times H \quad (2.115)$$

がかかり、(2.113) から磁気モーメントは角運動量を随伴するのでトルク  $T$  が角運動量変化を生む。すなわち

$$\frac{d\mu}{dt} = -\gamma \mu \times H. \quad (2.116)$$

あるいは単位体積あたりの磁気モーメントである磁化  $M$  で書くと

$$\frac{dM}{dt} = -\gamma M \times H. \quad (2.117)$$

これは磁化の変化方向が磁化と外部磁場の両方に直交する方向であり、磁化  $M$  が外部磁場  $H$  を軸に歳差運動をすることを表している。例えば外部磁場  $B$  を  $z$  軸方向にかけてはじめ磁化  $M$  が外部磁場から角度  $\theta$  だけ傾いた状態で  $xz$  平面内にある場合を考える(図 2.8)。

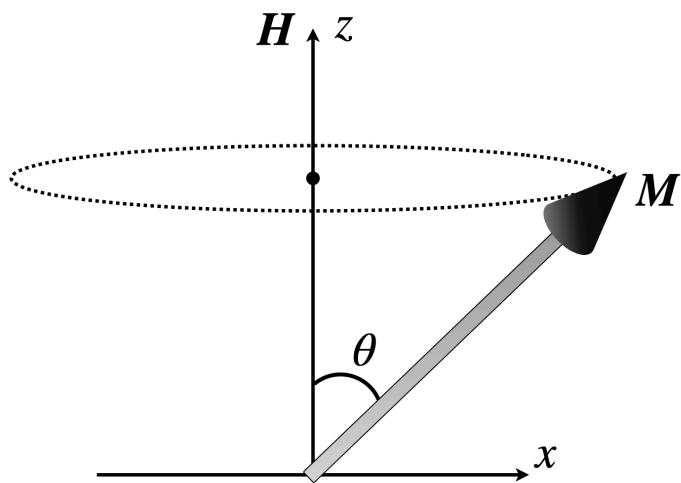


図 2.8 外部磁場下における磁化の歳差運動

このとき (2.117) は

$$\dot{M}_x = -\gamma H M_y \quad (2.118)$$

$$\dot{M}_y = \gamma H M_x \quad (2.119)$$

$$\dot{M}_z = 0 \quad (2.120)$$

のように書ける。これを解くと

$$M_x(t) = |\mathbf{M}| \sin \theta \cos(\omega_0 t). \quad (2.121)$$

$$M_y(t) = |\mathbf{M}| \sin \theta \sin(\omega_0 t). \quad (2.122)$$

$$M_z(t) = |\mathbf{M}| \cos \theta. \quad (2.123)$$

このように  $M_z$  は定数であり  $M_x, M_y$  は角周波数

$$\omega_0 = \gamma H \quad (2.124)$$

で歳差運動していることがわかる。しかしながら実際には外部磁場をかけても磁化が傾き角  $\theta$  を変えないまま歳差運動し続けるということは起こらず、スピン軌道相互作用などを介した格子系へのエネルギー散逸により回転は減衰し、最終的に磁化  $\mathbf{M}$  は外部磁場  $\mathbf{H}$  の方向に倒れてくる。このような緩和項を現象論的に導入した方程式が Landau、Lifshits、Gilbert によって提案され、次のように書かれる。

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H} + \frac{\alpha}{M} \left[ \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right]. \quad (2.125)$$

ここに  $\alpha$  はギルバードダンピング定数とよばれ、歳差運動の減衰時定数  $\tau$  をもちいて  $\alpha \simeq 1/(\tau \omega_0) = 1/(\tau \gamma H)$  [24] と書かれ、 $\alpha$  が大きいほど  $\tau$  は短くなり急速に減衰することを示している。この (2.125) を Landau-Lifshits-Gilbert(LLG) 方程式という。

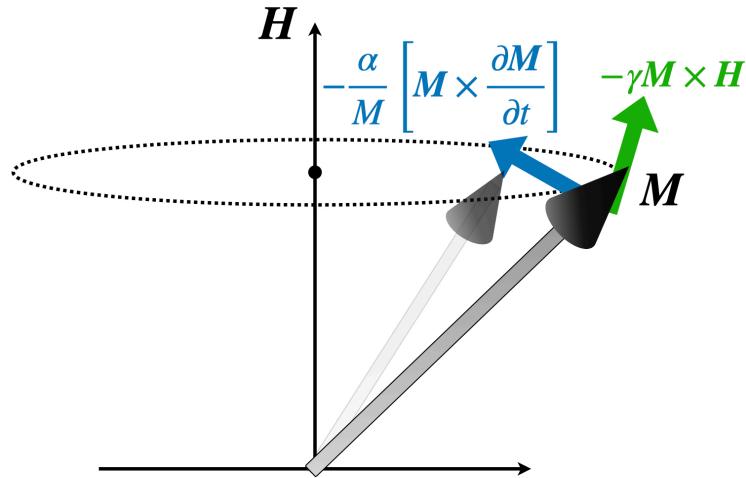


図 2.9 磁化の歳差運動の緩和過程

さらにこの磁化をもった強磁性体にスピン流が流れ込んだ場合を考える。伝導電子のスピン角運動量が強磁性体の磁化に受け渡され磁化が回転する。このときの受け渡されるトルクをスピントransferトルク (Spin Transfer Torque: STT) という。角運動量保存に相当する式

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{M}(\mathbf{r}) = -(-\gamma) \operatorname{div} \mathbf{J}_s(\mathbf{r}) = \gamma \operatorname{div} \mathbf{J}_s(\mathbf{r}) \quad (2.126)$$

を強磁性体内で磁化が一様であるとして全体に対して積分すると

$$\frac{\partial}{\partial t} \int dV \mathbf{M} = \gamma \int dV \operatorname{div} \mathbf{J}_s. \quad (2.127)$$

強磁性体の磁化は一様なので (2.127) の左辺は強磁性体の磁気モーメント  $MV$  の時間変化  $\partial MV / \partial t$  となり、右辺は面積分の形に書き換えて

$$\frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial t} (MV) = \int dS \mathbf{J}_s := \Delta \mathbf{J}_s. \quad (2.128)$$

ここで (2.128) 右辺の面積分  $\Delta \mathbf{J}_s$  は磁性体に吸収されたスピン流であり、大きさは  $|j_s| \hbar / 2e$  で局所的な向きとしてはスピン偏極方向  $\sigma$  と逆方向を向くベクトルである。スピントランスマートルクは磁化  $\mathbf{M}$  に垂直な成分で磁化を傾ける向き、すなわち damping-like な向きのみであると仮定すると

$$\Delta \mathbf{J}_{s\perp} = \mathbf{m} \times (\mathbf{m} \times \Delta \mathbf{J}_s). \quad (2.129)$$

ここで  $\mathbf{m}$  は磁化  $\mathbf{M}$  の単位ベクトルである。このスピントランスマートルクを含めて書き直した LLG 方程式は

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H} + \frac{\alpha}{M} \left[ \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right] + \tau_{\text{STT}}. \quad (2.130)$$

ただし

$$\tau_{\text{STT}} = C \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \sigma) \quad (2.131)$$

$$C = -\frac{\gamma \hbar g(\theta) |j_s|}{2d M_s^2 e} \quad (2.132)$$

であり、ここに  $d$  は磁性体の膜厚、 $M_s$  は飽和磁化である。 $g(\theta)$  はスピン注入効率とよばれスピン分極ベクトル  $\sigma$  と磁化  $\mathbf{M}$  とのなす角  $\theta$  に依存する量で以下のように書ける [7]。

$$g(\theta) = \left[ -4 + \frac{(1+P)^3(3+\cos\theta)}{4P^{3/2}} \right]^{-1}. \quad (2.133)$$

ここで  $P$  はアップスピンとダウンドラインスピンの数密度  $n_\uparrow, n_\downarrow$  で

$$P = \frac{n_\uparrow - n_\downarrow}{n_\uparrow + n_\downarrow} \quad (2.134)$$

のように定義されるスピン分極率である。

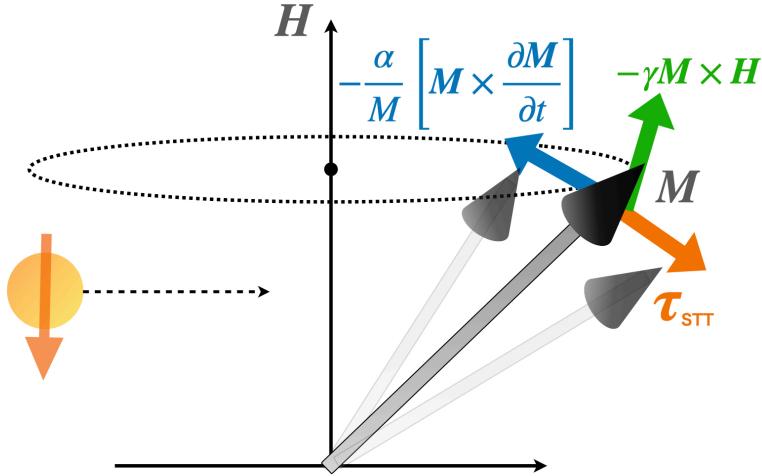


図 2.10 STT による磁化変化

### 2.3.2 強磁性共鳴

強磁性体が磁場  $\mathbf{H}$  の中に置かれると磁化は LLG 方程式に従い歳差運動しながら緩和していく。ここで  $\mathbf{H}$  に直角に同じ周波数  $\omega_0$  の高周波磁場  $\mathbf{h}$  を加えると、磁化は減衰することなく歳差運動を継続する。この歳差運動が空間的に一様で位相差がない場合、この現象を強磁性共鳴 (ferromagnetic resonance: FMR) と呼ぶ。FMR を具体的に記述するために  $y$  方向を深さ方向にもつ薄板形強磁性体に、 $x$  方向に静磁場  $H$  を、 $yz$  面内に円偏光交流磁場  $\mathbf{h}_{\text{rf}} = (0, h_y, h_z)$  を印加する場合を考える。

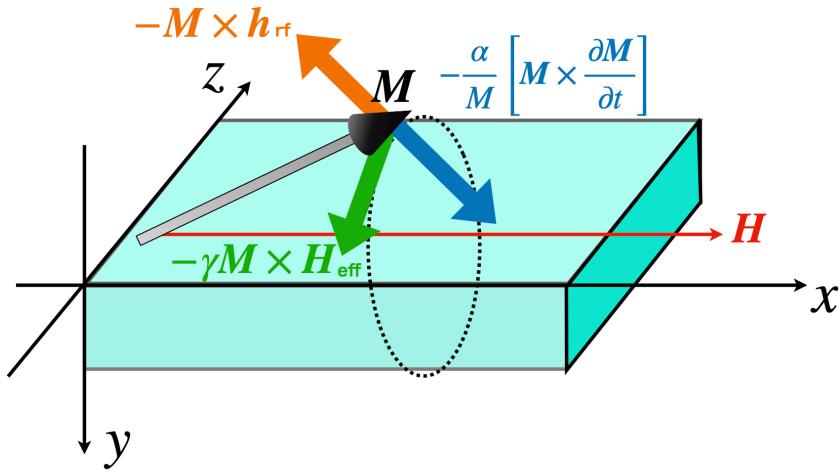


図 2.11 強磁性共鳴

磁化のダイナミクスは (2.125) の LLG 方程式に従い

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} - \gamma \mathbf{M} \times \mathbf{h}_{\text{rf}} + \frac{\alpha}{M_s} \left[ \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right]. \quad (2.135)$$

ここで  $\mathbf{H}_{\text{eff}}$  は有効磁場であり、実際に磁化  $\mathbf{M}$  に働く磁場は外部磁場の他にいくつかの磁場を含むが、ここでは結晶異方性磁場などは本実験で用いた NiFe の場合には小さいとして反磁場  $H_d$  のみを取り出して

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = \mathbf{H} + \mathbf{H}_d = \begin{pmatrix} H \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{pmatrix} \frac{\mathbf{M}}{\mu_0}. \quad (2.136)$$

ここで  $N_x, N_y, N_z$  は  $N_x + N_y + N_z = 1$  をみたす反磁場係数であり、 $y$  方向を深さ方向にもつ薄膜では  $N_x, N_z \ll N_y \simeq 1$  となる。円偏光交流磁場  $\mathbf{h}_{\text{rf}}$  及び磁化  $\mathbf{M}$  が角振動数  $\omega$  で振動すると仮定し、それぞれ

$$\mathbf{h}_{\text{rf}} = \begin{pmatrix} 0 \\ h_y \\ h_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ h_{y0} e^{i\omega t} \\ -i h_{z0} e^{i\omega t} \end{pmatrix}, \quad (2.137)$$

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_s \\ m_{y0} e^{i\omega t} \\ -i m_{z0} e^{i\omega t} \end{pmatrix} \quad (2.138)$$

とおく。まず共鳴周波数  $\omega_{\text{res}}$  と静磁場  $H$  との関係を導く。(2.135)において交流磁場の寄与である第二項が緩和項である第三項を打ち消すと考えることができ、(2.137)(2.138)を代入して  $y, z$  成

分を整理すると

$$\begin{pmatrix} -i\omega/\gamma & -H - (N_z - N_x)M_s/\mu_0 \\ H + (N_y - N_x)M_s/\mu_0 & -i\omega/\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_y \\ m_z \end{pmatrix} = 0 \quad (2.139)$$

を得る。 $m_y, m_z$  が非自明な解を持つことから以下が導かれる。

$$\omega_{\text{res}} = \gamma \sqrt{\left( H + (N_z - N_x) \frac{M_s}{\mu_0} \right) \left( H + (N_y - N_x) \frac{M_s}{\mu_0} \right)}. \quad (2.140)$$

(2.140) は Kittel の式とよばれる。

FMR におけるエネルギー吸収については (2.135)(2.136) に (2.137)(2.138) を代入し、 $m_y, m_z$  について整理すると

$$\begin{pmatrix} m_y \\ m_z \end{pmatrix} = \frac{\gamma M_s}{(\gamma H - i\alpha\omega + \gamma M_s/\mu_0)(\gamma H - i\alpha\omega) - \omega^2} \begin{pmatrix} \gamma H - i\alpha\omega & -i\omega \\ i\omega & \gamma H - i\alpha\omega + \gamma M_s/\mu_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_y \\ h_z \end{pmatrix}. \quad (2.141)$$

ただし十分に薄い薄膜を仮定し  $N_x = N_z = 0, N_y = 1$  とした。これを以下のように書き直す。

$$\begin{pmatrix} m_y \\ m_z \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} \chi_{yy} & i\kappa \\ -i\kappa & \chi_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_y \\ h_z \end{pmatrix}. \quad (2.142)$$

このように交流磁場に対する磁化の応答を表したとき、 $\chi_{yy} = \chi'_{yy} - i\chi''_{yy}$ ,  $\chi_{zz} = \chi'_{zz} - i\chi''_{zz}$ ,  $\kappa = \kappa' - i\kappa''$  は複素磁化率と呼ばれ、 $\alpha^2 \ll 1$  の過程を用いて以下のように計算できる。

$$\chi'_{yy} = \frac{\gamma^2 M_s [(\omega_{\text{res}}^2 - \omega^2)H + \alpha^2 \omega^2(H + M_s/\mu_0)]}{[\omega_{\text{res}}^2 - \omega^2]^2 + [\alpha\gamma\omega(2H + M_s/\mu_0)]^2} \quad (2.143)$$

$$\chi''_{yy} = \frac{\alpha\gamma M_s \omega [(\gamma H)^2 + \omega^2]}{[\omega_{\text{res}}^2 - \omega^2]^2 + [\alpha\gamma\omega(2H + M_s/\mu_0)]^2} \quad (2.144)$$

$$\chi'_{zz} = \frac{\gamma^2 M_s [(\omega_{\text{res}}^2 - \omega^2)(H + M_s/\mu_0) + \alpha^2 \omega^2 H]}{[\omega_{\text{res}}^2 - \omega^2]^2 + [\alpha\gamma\omega(2H + M_s/\mu_0)]^2} \quad (2.145)$$

$$\chi''_{zz} = \frac{\alpha\gamma M_s \omega [(\gamma H + \gamma M_s/\mu_0)^2 + \omega^2]}{[\omega_{\text{res}}^2 - \omega^2]^2 + [\alpha\gamma\omega(2H + M_s/\mu_0)]^2} \quad (2.146)$$

$$\kappa' = \frac{\gamma M_s \omega [\omega_{\text{res}}^2 - \omega^2]}{[\omega_{\text{res}}^2 - \omega^2]^2 + [\alpha\gamma\omega(2H + M_s/\mu_0)]^2} \quad (2.147)$$

$$\kappa'' = \frac{\alpha\gamma M_s \omega^2 [2\gamma H + \gamma M_s/\mu_0]}{[\omega_{\text{res}}^2 - \omega^2]^2 + [\alpha\gamma\omega(2H + M_s/\mu_0)]^2}. \quad (2.148)$$

以上の結果から FMR によって磁化が交流磁場から吸収する単位時間、単位体積あたりのエネルギーは以下のように計算できる。

$$P_{\text{FMR}} = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \left[ \text{Im}(\mathbf{H}_{\text{eff}}) \cdot \text{Im} \left( \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right) \right] dt = \frac{\omega}{2} [\chi''_y h_{y0}^2 + 2\kappa'' h_{y0} h_{z0} + \chi''_{zz} h_{z0}^2]. \quad (2.149)$$

つまり磁化が吸収するエネルギーは複素磁化率の虚部によって決まり、周波数に関して Lorentz 関数形となる。

なお  $\kappa''$  に比例する交差項は (2.137)(2.138) で仮定したように交流磁場が円偏振磁場である場合に生じるエネルギー吸収であり、 $h_y$  と  $h_z$  が同位相であるような直線偏振磁場である場合にはゼロになる。

### 2.3.3 スピン波共鳴

前節では磁化が一様ですべてのスピンが同位相で歳差運動する場合を考えたがこのような場合はむしろ特別であり、もしひとつつのスピンが他と少しずれてしまつたとすると隣のスピンは交換相互作用で平行になろうとしているためにこれもズレることになる。このズレは隣から隣へと伝わってゆき、このようにスピンすなわち磁化が位相をずらしながら歳差運動をするような現象をスピン波とよび、スピン波による磁気共鳴をスピン波共鳴 (spin wave resonance: SWR) という。スピン波を記述するのに通常の波動と同じく波数ベクトル  $\mathbf{k}$  を導入する。今  $y$  方向に深さをもつ薄膜で  $x$  方向に静磁場  $H$  を印加し、同じく  $x$  方向に波数  $k$  で伝搬するスピン波が励起されている場合を考える。このような静磁場とスピン波の波数ベクトルが平行なスピン波を後退体積波 (backward volume wave: BVW) という。

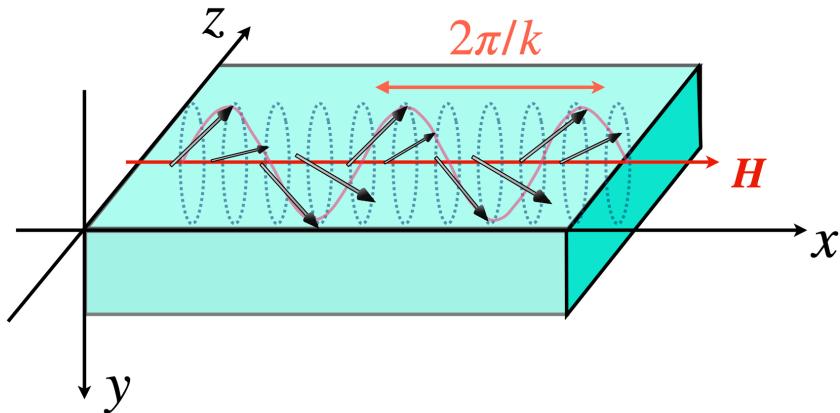


図 2.12 磁化の歳差運動軸とスピン波の波数ベクトルが平行な BVW の励起

BVW が励起されるとき、ある位置での磁化のダイナミクスは (2.125) の LLG 方程式に従い次のように表される。

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \frac{\alpha}{M_s} \left[ \mathbf{M} \times \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right]. \quad (2.150)$$

ここで  $\mathbf{H}_{\text{eff}}$  は (2.135)(2.136) の LLG 方程式から磁化の間に働く交換磁場  $\mathbf{h}_{\text{ex}}$  と双極子磁場  $\mathbf{h}_{\text{di}}$  が付け加わって次のように書ける。

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{\text{eff}} &= \mathbf{H} + \mathbf{H}_{\text{d}} + \mathbf{h}_{\text{rf}} + \mathbf{h}_{\text{ex}} + \mathbf{h}_{\text{di}} \\ &= \begin{pmatrix} H \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -M_s/\mu_0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ h_y \\ h_z \end{pmatrix} + \frac{2A}{M_s^2} \nabla^2 \mathbf{M} + \nabla \int \frac{\nabla' \cdot \mathbf{M}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|'} d\mathbf{r}'. \end{aligned} \quad (2.151)$$

ここで  $A$  は交換定数であり、 $N_x = N_z = 0$ ,  $N_y = 1$ とした。 $x$  方向に波数  $k$  で伝搬するスピン波としての解は

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_s \\ m_{y0}(y)e^{-i(kx-\omega t)} \\ -im_{z0}(y)e^{-i(kx-\omega t)} \end{pmatrix}. \quad (2.152)$$

のようにおくことができるため、(2.150)(2.151) に代入すると次のようになる。

$$i\omega m_y = -\gamma \left( H + \frac{2A}{M_s^2} \left[ k^2 - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] \right) m_z + \gamma(h_z + h_{\text{di}}^z) M_s - i\alpha\omega m_z. \quad (2.153)$$

$$i\omega m_z = \gamma \left( H + \frac{2A}{M_s^2} \left[ k^2 - \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] \right) m_y - \gamma \left( h_y + h_{\text{di}}^y - \frac{M_s}{\mu_0} \right) M_s + i\alpha\omega m_y. \quad (2.154)$$

これらの方程式を  $m_y, m_z$  について解くことによって、BVW の周波数と静磁場の関係式を導くことができ、この関係式は BVW の周波数と波数の関係も記述することから BVW の分散関係と呼ばれる。薄板形強磁性体の膜厚  $d$  を十分小さいとして、BVW の分散関係が以下のように求まる [7]。

$$\omega_{\text{res}} = \gamma \sqrt{\left( H + \frac{2A}{M_s} k^2 \right) \left( H + \frac{2A}{M_s} k^2 + \frac{M_s}{\mu_0} \frac{1 - e^{-kd}}{kd} \right)}. \quad (2.155)$$

なお BVW の波数  $k$  が十分小さいとき、交換磁場  $2Ak^2/M_s$  が静磁場  $H$  よりも十分小さいため、交換相互作用の寄与を無視できる。このような BVW を特に静磁後退体積波 (magnetostatic backward volume wave: MSBVW) といい、MSBVW の分散関係は次のようにになる。

$$\omega_{\text{res}} = \gamma \sqrt{H \left( H + \frac{M_s}{\mu_0} \frac{1 - e^{-kd}}{kd} \right)} \quad (2.156)$$

$N_x = N_z = 0, N_y = 1$  とした (2.140) の Kittl の式と比較すると実効的な反磁場が  $(1 - e^{-kd})/kd$  だけ小さくなっていることがわかる。また複素磁化率および MSBVW の励起によるエネルギー吸収についても前節の FMR の場合と同様に計算することができて

$$P_{\text{MSBVW}} = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \left[ \text{Im}(\mathbf{H}_{\text{eff}}) \cdot \text{Im} \left( \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t} \right) \right] dt = \frac{\omega}{2} [\chi''_{yy} h_{y0}^2 + 2\kappa'' h_{y0} h_{z0} + \chi''_{zz} h_{z0}^2]. \quad (2.157)$$

ここで複素磁化率は前節の FMR の場合の結果において反磁場  $M_s/\mu_0$  の部分を  $(1 - e^{-kd})/kd$  だけ小さくなった実効的な反磁場に置き換えたものである。

### 2.3.4 STT によるスピン波共鳴

非磁性体 (non-magnetic material: NM) と強磁性体 (ferromagnetic material: FM) を使って、 $y$  方向を深さ方向にもつ FM/NM の 2 層膜を考える (図 2.13)。

NM、FM はそれぞれスピン流生成層、検出層の役割を果たす。ここに  $x$  方向へ伝播する R-SAW が励起されると 2.2.4 節で述べたように渦度勾配によって NM 層に交流スピン流が生成され、FM 層に注入される。そうすると (2.131)(2.132) で荒らされるスピントランスマートルク  $\tau_{\text{STT}}$  が磁化にかかるため、(2.156) で表される分散関係を満たす静磁場を印加することによってスピン波が励起される (spin transfer torque spinwave resonance: STT-SWR)。スピン流の空間分布が R-SAW の波数に一致するため、このスピン波の波数ベクトルは R-SAW の波数ベクトルに一致する。(2.131)(2.132) で表される STT を以下のように変形する。

$$\boldsymbol{\tau} = -\gamma \mathbf{M} \times \mathbf{h}_{\text{STT}}. \quad (2.158)$$

$$\mathbf{h}_{\text{STT}} = \frac{\hbar g(\phi) |j_s|}{2eMd} \mathbf{M} \times \boldsymbol{\sigma} = \frac{\hbar g(\phi) |j_s|}{2eMd} \cos \phi e^{-i(kx - \omega t)} \mathbf{e}_y. \quad (2.159)$$

ここで  $\phi$  は  $x$  軸からの面内磁場印加角度であり、本実験の場合  $\phi = 0$  である。 $e_y$  は  $y$  方向の単位ベクトルである。このように STT は深さ方向の有効磁場  $\mathbf{h}_{\text{STT}}$  として磁化に作用する。従って (2.157) より磁化が

$$P_{\text{SWR}} = \frac{\omega}{2} \chi''_{yy} |\mathbf{h}_{\text{STT}}|^2 \propto |j_s|^2 g(\phi)^2 \cos^2 \phi \quad (2.160)$$

のエネルギーを吸収する。このとき吸収されたエネルギーを透過マイクロ波の減衰として電気的に測定することでスピン流を検出した。なお (2.160) より減衰量がスピン流の大きさの 2 乗に比例するため、スピン流が時間的、空間的に交流でも検出が可能である。

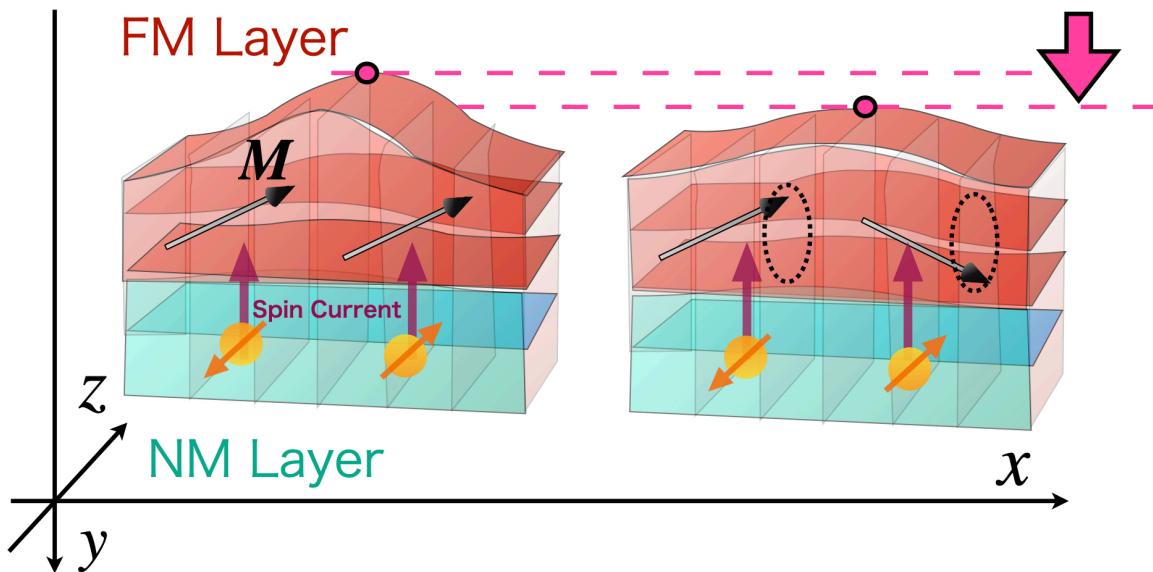


図 2.13 SWR 由来の R-SAW の減衰測定によるスピン流検出

## 第3章

# 実験方法

### 3.1 試料作製

#### 3.1.1 素子設計

本実験で用いた素子の概略図を図 3.1 に示す。この素子は圧電基盤 ( $\text{LiNbO}_3$ ) と基板上に成膜された FM、NM 層の膜、2 つのすだれ状電極 (Inter Digital Transducer: IDT) で構成されている。IDT は  $\text{Ti}(3)/\text{Au}(30)$  によって作製した (ここで括弧内の数字は nm 単位の膜厚を表し、以下この表記を断りなく用いる)。一対の IDT 間の距離は  $460 \mu\text{m}$  であり、櫛幅および櫛間隔  $d$  は  $1 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m}$ 、 $4 \mu\text{m}$  で櫛幅と櫛間隔が同じ長さになるように変化させた。このとき構造周期  $\lambda$  はそれぞれ  $4 \mu\text{m}$ 、 $8 \mu\text{m}$ 、 $16 \mu\text{m}$  である。櫛の本数は 11 と 17 のものを作製した (実際の測定ではきれいにスピノ波共鳴を観測することの出来る  $\lambda = 4 \mu\text{m}$ 、本数 17 の IDT を主に使用した)。

また一対の IDT の間には FM 層の膜として NiFe を、NM 層の膜としてスピノホール角の正負が異なる Mn、Pt を用いてそれぞれ Pt(6)/NiFe(20)、Mn(6)/NiFe(20)、Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40)、Pt(40)/NiFe(20)/Mn(40) の 1 辺  $400 \mu\text{m}$  および NiFe 単層の正方形の膜を作製した。

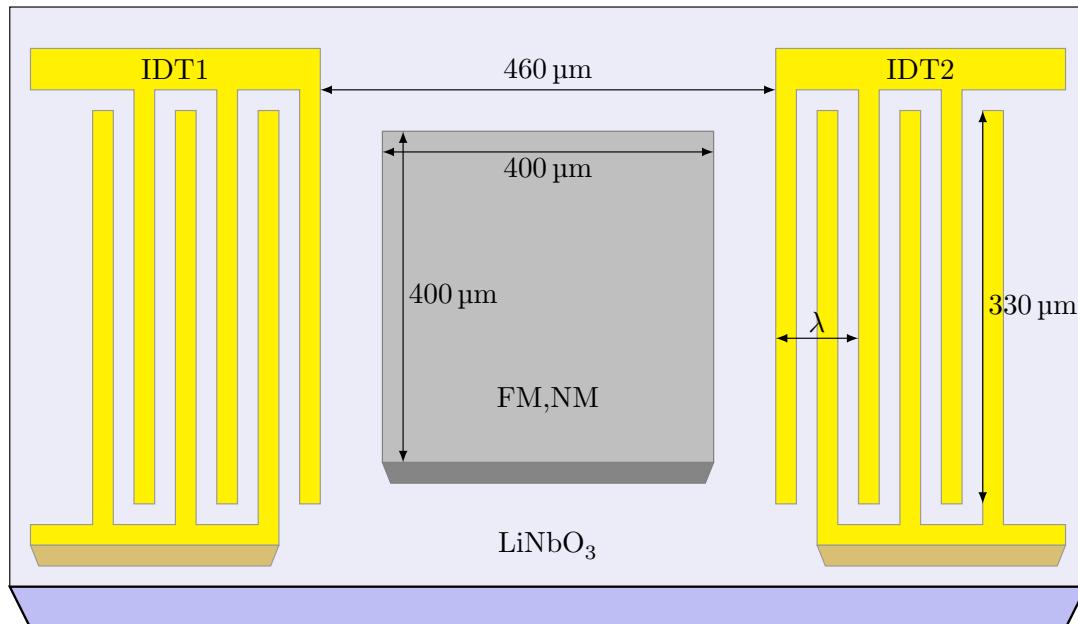


図 3.1 実験に用いた素子の概略図

IDT は図 3.1 のように互い違いに櫛が並んでいる。IDT が成膜されている  $\text{LiNbO}_3$  は圧電基盤

であり、ひずみを与えると電機分極が生じ(圧電効果)、逆に電場を加えるとひずみが生じる(逆圧電効果)。このことからIDTの一方を接地し、もう一方を交流電源に接続することで、逆圧電効果により、IDTの構造周期と同じ長さの波長のR-SAWを励起することができる。また励起されたR-SAWはFM、NM膜を通過した後、反対側のIDTの圧電効果によって検知できる。このように1対のIDTによってR-SAWを励起、検知する素子を遅延線形表面弾性波という。

### 3.1.2 素子作製

測定に用いた素子はリフトオフ法を用いて作製した。リフトオフ法とは基板上に均一に塗布されたレジストから成膜部分を取り除いた上で金属を蒸着し、後からレジストを剥がすことで基板に任意形状の薄膜を成膜する方法である。この素子作製の工程は図3.2に示したとおりである。

#### 洗浄

基板に付着したごみを取り除くため、LiNbO<sub>3</sub>圧電基板をジメチルアセトアミド(ZDMAC)、アセトン、2-プロパノール(IPA)の順に浸して10分ずつ超音波洗浄を行った。超音波洗浄後に光学顕微鏡で表面の観察を行い、ごみが付着している場合は綿棒で表面をこすって取り除いた。

#### レジスト塗布

洗浄後、窒素ガスで乾燥させた基板に描画用のレジストをスピンドルコーターを用いて均一に塗布した。電子線描画とレーザー描画では波長が異なるため使用するフォトレジストの種類が異なる。IDTの作製は電子線描画を行い、FM、NM層の膜はマスクレス露光装置PALETを用いて行った。まずは洗浄済みの基板を窒素ガスで乾燥させたあと、電子線描画用(EB)レジストを数滴たらし、スピンドルコーターを使って回転速度4000rpm、90sで均一に塗布した。EB用レジストはポジレジストZEP520-AとシンナーZEP-Aを2:1で混合した溶液である。その後シンナー除去や膜固定のために180°C、180sの条件でプリペイクを行った。さらに圧電基板は絶縁性であり、電子線の照射による基板のチャージアップを防ぐために、導電性コロイド(エスペーサー)をレジスト上に数滴垂らし、まず500rpm、10s、続いて1200rpm、30sの2段階回転で塗布した。

またマスクレス露光装置用のレジストにはAZ P1350を用いて回転速度2000rpm、90sで塗布した。レジストの水分の蒸発と膜固定のために100°Cで90sプリペイクを行った。

#### 描画

レジストを塗布した基板に電子線を照射し、設計したパターンを描画する手法を電子線描画(EB)という。電子線で照射されたレジスト部分が後述の現像の手順で抜け落ちる。EB装置は電子サイズでの微細なパターンを描画することができるため、ナノサイズのパターン作製が必要なIDTはEB装置を用いた。描画条件を表3.1に示す。

表3.1 EBの描画条件

加速電圧	電流量	ドーズ時間
20kV	320pA	2.5μs

一方FM、NM層の膜はEBに比べて装置の扱いが容易なマスクレス露光装置を用いて描画した。描画の条件を表3.2に示す。

表 3.2 マスクレス露光装置の露光条件

LED パワー	露光時間
26.5 %	0.5 s

## 現像

EB 描画後の基板をまず超純水に約 10 s 浸し、エスペーサーを取り除いた。次に現像液 ZED-N50 に 210 s、最後にリンス(固定液)ZMD-B に 60 s 浸して描画部分のレジストを取り除いた。設計通りのパターンが描画されていることを光学顕微鏡で確認した。

マスクレス露光装置で描画した基盤は現像液 AZ developer に 25 s、リンスとして純水に 30 s 浸して描画部分のレジストを取り除き、光学顕微鏡で確認した。

## 蒸着

成膜は真空蒸着で行った。蒸着とは金属ターゲットを蒸発させて基板上に成膜する方法である。ターゲットの蒸気圧を上げ、不純物を取り除くために成膜室は高真空中に保たれている。

IDT の成膜の際には Ti,Au ターゲットを電子線で加熱、蒸発させて基板上に Ti(3)/Au(30) を成膜した。

FM、NM 層の成膜の際には基板上に Pt(6)/NiFe(20)、Mn(6)/NiFe(20)、Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40)、Pt(40)/NiFe(20)/Mn(40)、NiFe(20) を蒸着した。

## リフトオフ

成膜後の基板を有機溶媒に浸し、レジストを溶解することによって基板上には描画した形の薄膜のみが残ることになる。この手順をリフトオフと呼ぶ。レジストが剥がれるまで ZDMAC に浸して必要に応じて超音波洗浄を行い、その後アセトン、IPA に浸して洗浄した。

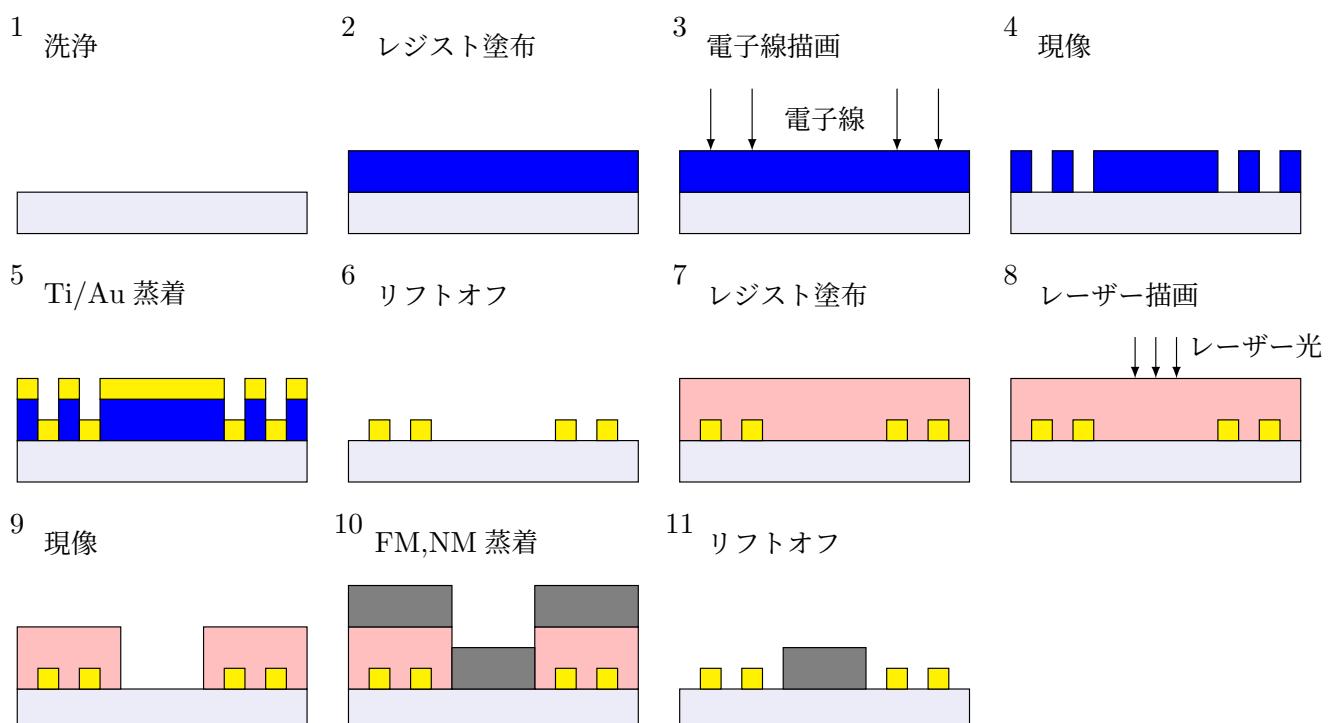


図 3.2 素子作製の工程

## 3.2 測定方法

### 3.2.1 ベクトルネットワークアナライザ測定

本実験では被測定回路の高周波特性をベクトルネットワークアナライザ (Vector Network Analyzer: VNA) を用いて調べた。VNA には Port1 と Port2 の 2 つの端子があり、2 または 1 つの端子間の反射信号及び透過信号を測定することができる。VNA が測定できるパラメータは S パラメータとよばれ、本実験では Port1 から Port2 への透過信号である  $S_{21}$  を測定した。信号は位相差と振幅をもった複素数で表示され S パラメータの絶対値  $|S|$  をデシベルで表す表記は LogMag  $S$  とよばれ以下のように表される。

$$|S| \text{ dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{|P_{\text{out}}| / \text{mW}}{|P_{\text{in}}| / \text{mW}} \right) \quad (\text{電力による表示}). \quad (3.1)$$

$$|S| \text{ dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{|V_{\text{out}}| / \text{V}}{|V_{\text{in}}| / \text{V}} \right) \quad (\text{電圧による表示}). \quad (3.2)$$

また入力パワーを表す単位として 1 mW を基準としたデシベル表示である dBm があり、

$$|x| \text{ dBm} = 10 \log_{10} \left( \frac{|P| / \text{mW}}{1 / \text{mW}} \right). \quad (3.3)$$

の関係が成り立つ。本実験での入力パワーはすべて  $P_{\text{in}} = -5 \text{ dBm} = 1^{-0.5} \text{ mW} = 0.32 \text{ mW}$  を行った。

また、本実験では被測定試料に磁場を掃引し、周波数を変えて  $S_{21}$  パラメータの変化を測定した。(2.160) の吸収エネルギーを評価するためにまず次のようなトレース演算を行った。

$$\Delta P_{21}(f, H) := |\mathbf{P}_{21}(f, H) - \mathbf{P}_{21}(f, H_{\text{ref}})|. \quad (3.4)$$

ここで  $\mathbf{P}_{21}(f, H)$  は周波数  $f$ 、掃引磁場  $H$  における  $S_{21}$  パラメータから計算される複素数表示した電力であり、 $H_{\text{ref}}$  は参照磁場であり本実験で用いた NiFe の磁化が飽和するのに十分な大きさである  $\mu_0 H = 30 \text{ mT}$  とした(図 3.3)。このようなトレース演算をすることにより磁場に依存しない信号を取り除くことができる。さらにこれを次のように規格化した。

$$\Delta P^{\text{norm}}(f, H) := \frac{\Delta P_{21}(f, H)}{P_{\text{SAW}}^{\text{peak}}(H_{\text{ref}})}. \quad (3.5)$$

ここで  $P_{\text{SAW}}^{\text{peak}}(H_{\text{ref}})$  は参照磁場  $H_{\text{ref}}$  での  $|\mathbf{P}_{21}(f, H_{\text{ref}})|$  の peak 強度である。

このようにして得られた  $\Delta P^{\text{norm}}(f, H)$  は分子分母がともに R-SAW の振幅  $u_0^2$  に比例するため、 $u_0$  に依存しなくなる。従って  $\Delta P^{\text{norm}}(f, H)$  を比較すれば、試料の個体差などによる  $u_0$  のばらつきの影響を受けずに定量比較を行うことが可能となる。

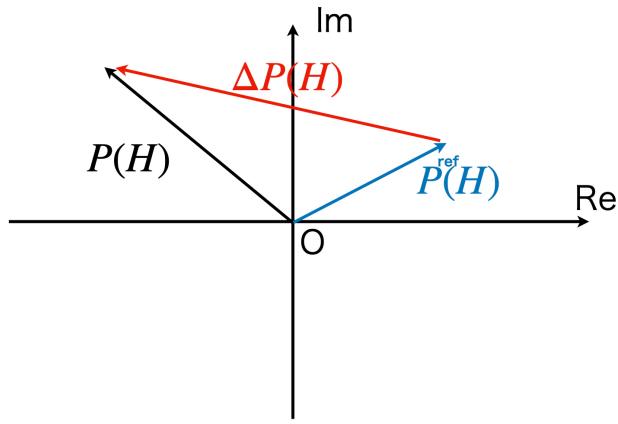


図 3.3 トレース演算のベクトル表現

### 3.2.2 ゲーティング処理

VNA 測定で我々が評価したいのは IDT で励起された R-SAW が最初にもう一方の IDT に到達した際の減衰量である。しかし実際には R-SAW よりも十分速く伝わる電磁波 (electromagnetic wave: EMW) や R-SAW の多重的な反射により到達した波 (triple transit echo: TTE) などがあり、これらのノイズを取り除く必要がある。そのため本実験では VNA で測定する周波数依存の信号を窓関数 (window function) をかけてから高速逆フーリエ変換 (inverse fast Fourier transform: IFFT) によって時間依存の信号に変換し、高速フーリエ変換 (fast Fourier transform: FFT) によってもとの周波数依存の信号に戻すことにより、特定の時間領域の信号、すなわち励起された R-SAW を最初に検知した時間領域の信号のみを取り出した。このような処理をゲーティング処理と呼ぶ。この際に用いた窓関数としては

$$w(x) = 0.54 - 0.46 \cos 2\pi x \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (3.6)$$

で表される hamming 窓を用いた。このゲーティング処理によって、不要応答である電磁波 (EMW) や多重反射波 (TTE) を取り除くことができる。

### 3.2.3 測定系

本実験における概略図を図 3.4 に示す。VNA と IDT 対をプローブコンタクトによって接続し、IDT1 によって励起された R-SAW が磁性層を通過した後 IDT2 によって検出される。この際に透過信号である  $S_{21}$  パラメータを R-SAW の伝播方向に静磁場  $H$  を印加しながら測定し、その  $S_{21}$  パラメータの変化から STT-SWR(2.160) を検出した。測定条件を表 3.3 に示す。

表 3.3 VNA 測定条件

開始周波数	終了周波数	周波数点数	入力電力強度	バンド幅	開始磁場	終了磁場	磁場点数
10 MHz	2 GHz	3201	-5 dBm	700 Hz	30 mT	-30 mT	301

ただし NM、FM 層を蒸着するまえの IDT のみの試料の性能評価の際には終了周波数 5 GHz、磁場 0 mT で測定した。

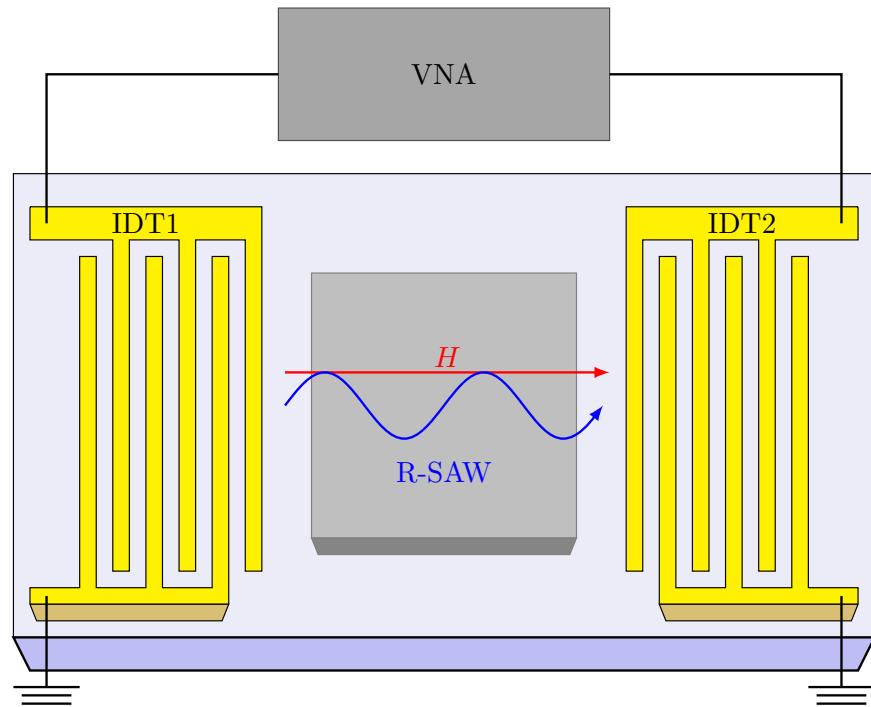


図 3.4 STT-SWR の測定系

## 第 4 章

# 実験結果

### 4.1 IDT 素子測定結果

まず NM、FM 層を蒸着する前の IDT のみの状態で測定した結果を示す。櫛の本数はすべて 17 で測定したものである。

構造周期  $\lambda = 4 \mu\text{m}$  の IDT において、測定した周波数領域での信号に窓関数 (3.6) を掛けた後 IFFT を施して時間領域信号にしたのが図 4.1 である。

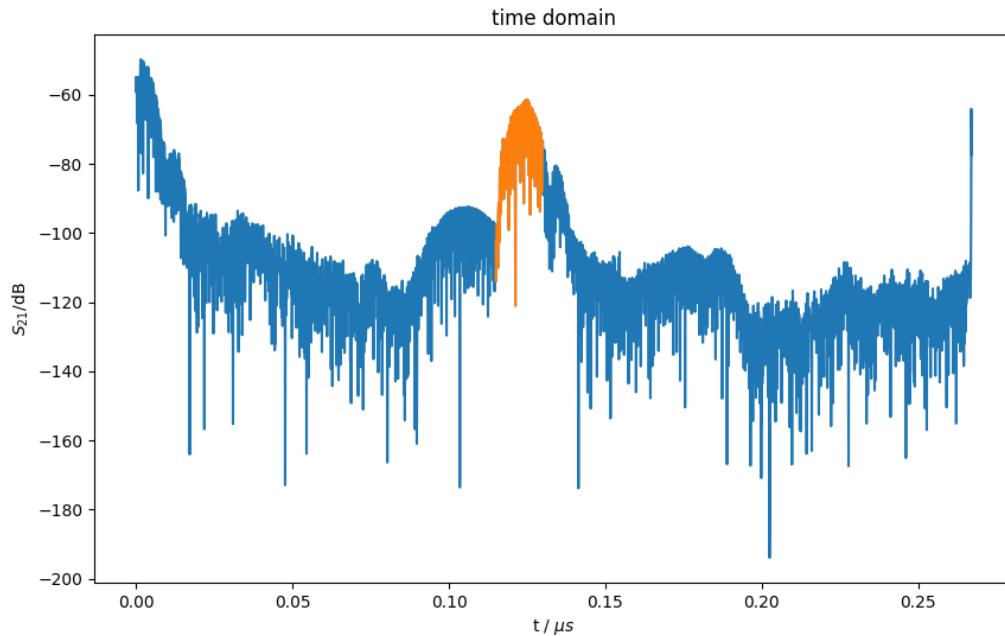


図 4.1  $\lambda = 4 \mu\text{m}$  における IFFT した時間領域信号

ここで EMW と TTE による信号を取り除くために、図 4.1 でオレンジ色に示した R-SAW が初めて到達した部分の信号のみを取り出し、再び FFT によって周波数領域の信号に戻すゲーティング処理を行った結果が図 4.2 である。実際には時間領域での信号の取り出しあは図 4.2 のゲーティング処理の結果をみて基本波の強度が減衰することなく取り出せた領域を探しておこなった。逆にこの結果と IDT 間の距離から SAW の伝達速度を見積もることができ、実際約  $4000 \text{ m s}^{-1}$  と妥当な結果が得られている。

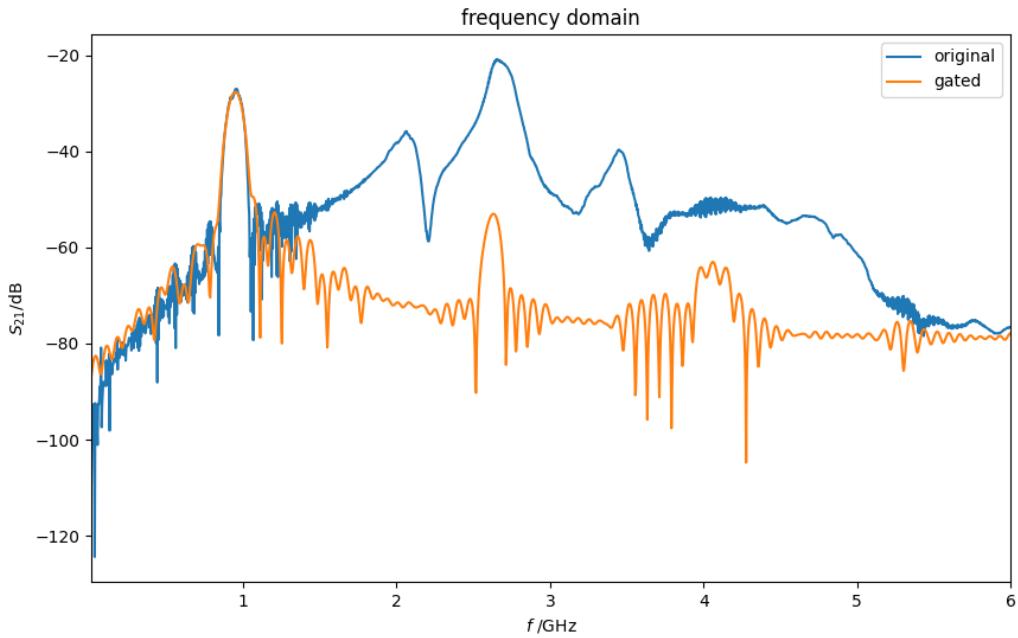


図 4.2  $\lambda = 4 \mu\text{m}$  におけるゲーティング処理した周波数領域信号

図 4.2 の青色で示した信号が original の信号 (に窓関数を掛けたもの) であり、オレンジで示したのがその信号をゲーティング処理をした後の信号である。基本モード以外にその三倍の周波数である三次モードや、少し潰れてはいるが五次モードも励起されていることがわかる。

同様に測定した構造周期  $\lambda = 8 \mu\text{m}$  の IDT における測定結果は図 4.3、図 4.4 のようになった。

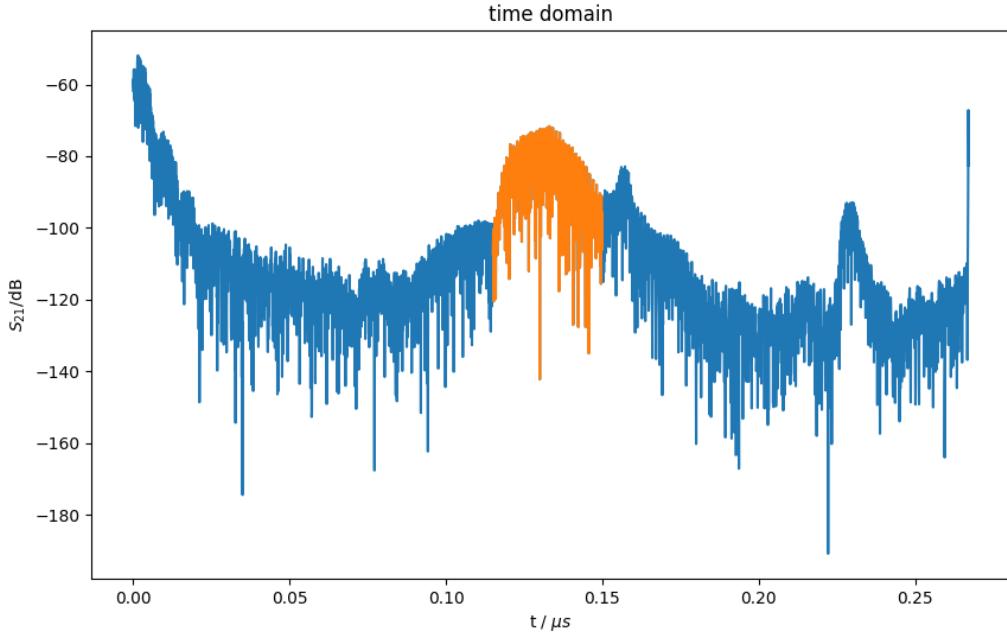


図 4.3  $\lambda = 8 \mu\text{m}$  における IFFT した時間領域信号

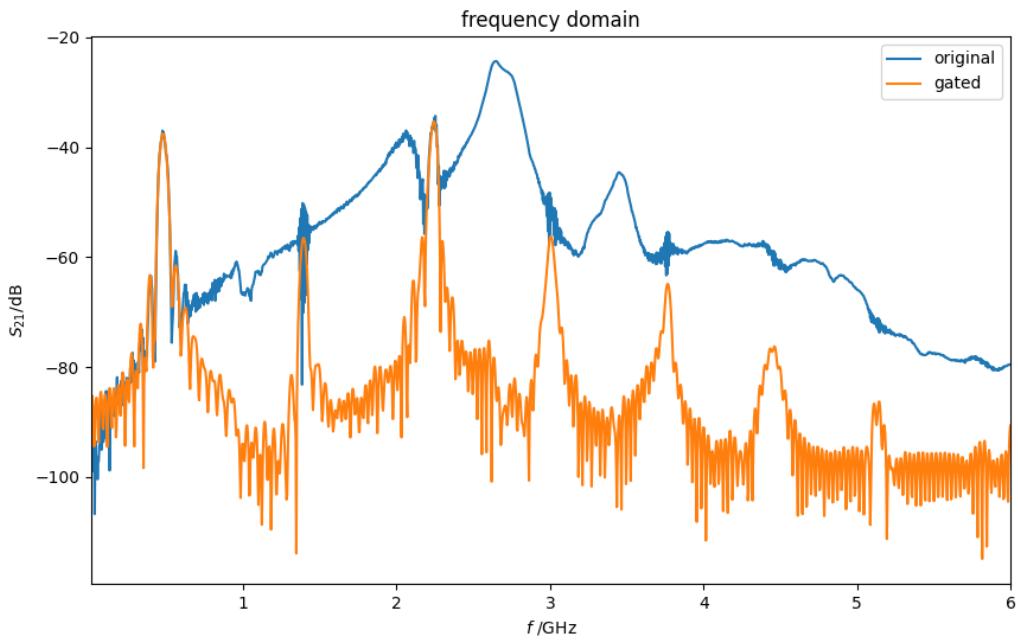


図 4.4  $\lambda = 8 \mu\text{m}$  におけるゲーティング処理した周波数領域信号

構造周期が大きい IDT においては波長が長くなつた分、励起される波の周波数が小さくなつて いる。

最後に構造周期  $\lambda = 16 \mu\text{m}$  の IDT における測定結果は図 4.5、図 4.6 のようになつた。

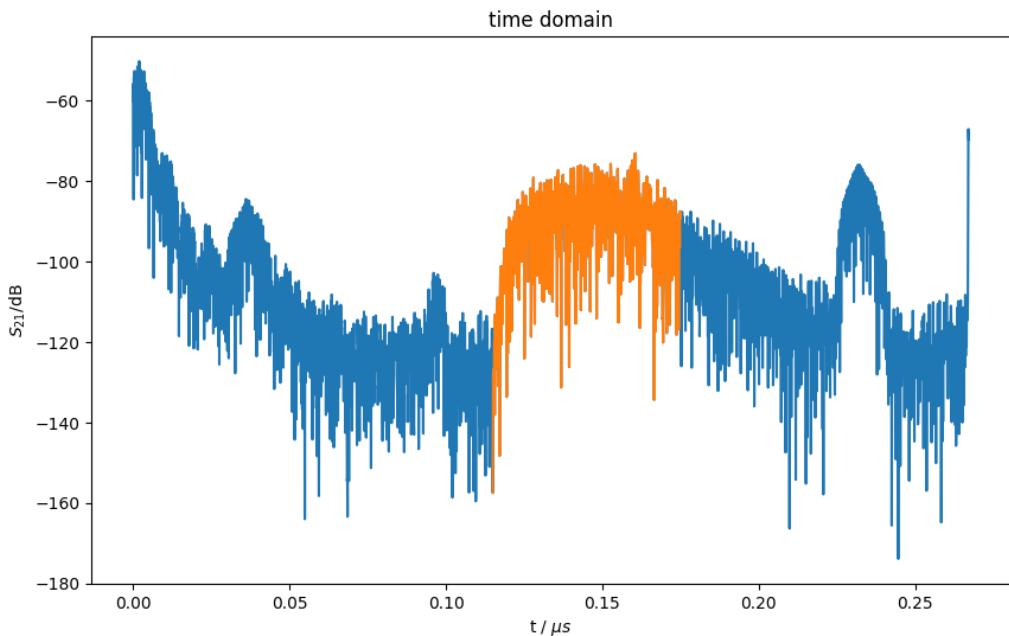


図 4.5  $\lambda = 16 \mu\text{m}$  における IFFT した時間領域信号

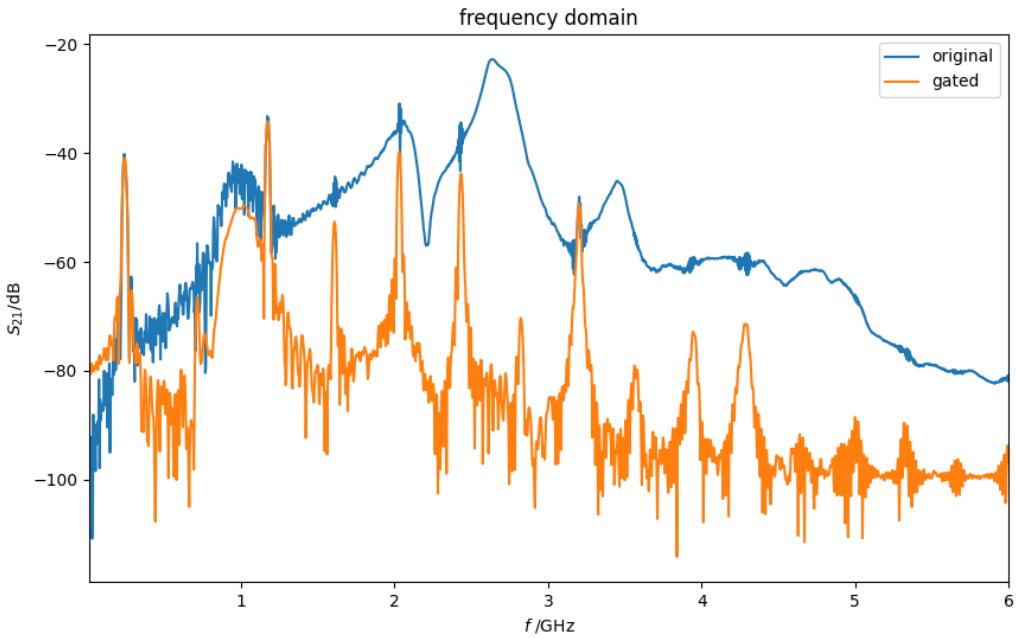


図 4.6  $\lambda = 16 \mu\text{m}$  におけるゲーティング処理した周波数領域信号

さらに構造周期が大きく波長が長くなった分、励起される波の周波数が小さくなっている。また高次モードは 3 次モードが潰れているが他の高次モードはきれいに見ることが出来た。

しかしながら本実験では高次モードを利用したスピン波共鳴はうまく観測することが出来ず、続く 4.2 節の結果では基本モードで励起される基本波のみを扱って測定した。また IDT の構造周期が大きい場合にもスピン波共鳴がうまく観測することが出来なかったため、構造周期が  $\lambda = 4 \mu\text{m}$  の IDT のみを使って測定した。

得られた基本モードの周波数を表 4.1 に示す。

表 4.1 基本モードの周波数

構造周期 $\lambda / \mu\text{m}$	基本周波数 $f / \text{GHz}$
4	0.94
8	0.48
16	0.24

## 4.2 試料測定結果

本実験で測定に用いた試料を表 4.2 で示す。

表 4.2 測定に使用した試料

試料番号	材料構成 (括弧内の数値は nm 表記の膜厚)
1	LiNbO <sub>3</sub> /Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40)
2	LiNbO <sub>3</sub> /Pt(6)/NiFe(20)
3	LiNbO <sub>3</sub> /Mn(6)/NiFe(20)
4	LiNbO <sub>3</sub> /Pt(40)/NiFe(20)/Mn(40)
5	LiNbO <sub>3</sub> /NiFe(20)

4.1 節の最後で述べたようにこの節での結果はすべて表 4.3 の IDT 条件で測定した結果である。

表 4.3 使用した IDT の構造

柵本数	構造周期 $\lambda / \mu\text{m}$	使用モード
17	4	基本モード

#### 4.2.1 Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40) の測定結果

外部磁場を  $\mu_0 H = 30 \text{ mT}$  印加したときの Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40) での IFFT を施した時間領域信号とゲーティング処理後の周波数領域信号を図 4.7 に示す。

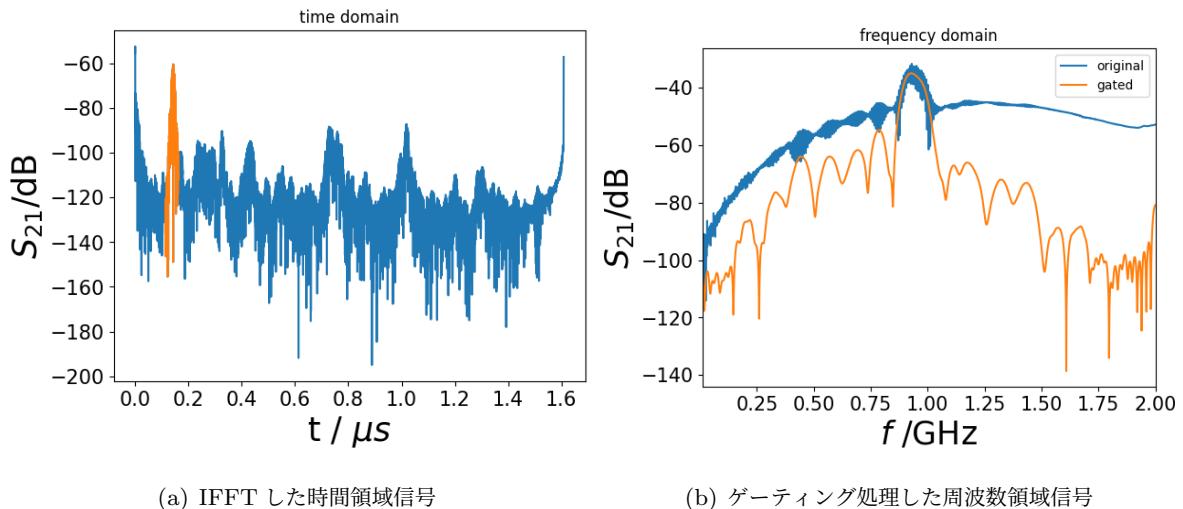


図 4.7 Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40) での  $S_{21}$  の測定結果 ( $\mu_0 H = 30 \text{ mT}$ )

共鳴周波数のところで  $S_{21} \simeq -40 \text{ dB}$  付近でやや小さい値をとっている。

ここで外部磁場を  $\mu_0 H = 30 \text{ mT}$  から Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40) での  $\mu_0 H = -30 \text{ mT}$  まで変化させて同様の周波数範囲で測定し、(3.5) で表される  $\Delta P^{\text{norm}}(f, H)$  を測定した結果を図 4.8 に示す。

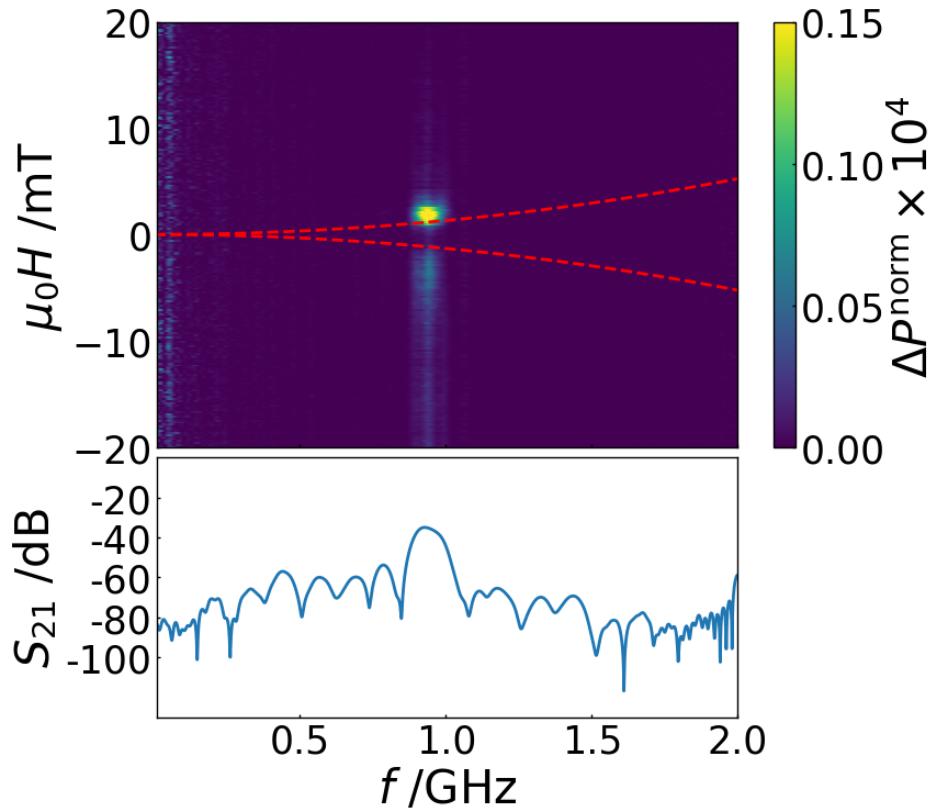


図 4.8 Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40) での  $\Delta P^{\text{norm}}$  の測定結果

ここで図 4.8 の赤点線で示した部分は (2.156) で示した MSBVW の分散関係で NiFe の飽和磁化  $M_s = 1.07$  T、強磁性体の膜厚  $d = 20$  nm として計算したものである。また図 4.8において共鳴周波数 0.92 GHz での断面をとった図が図 4.9 である。

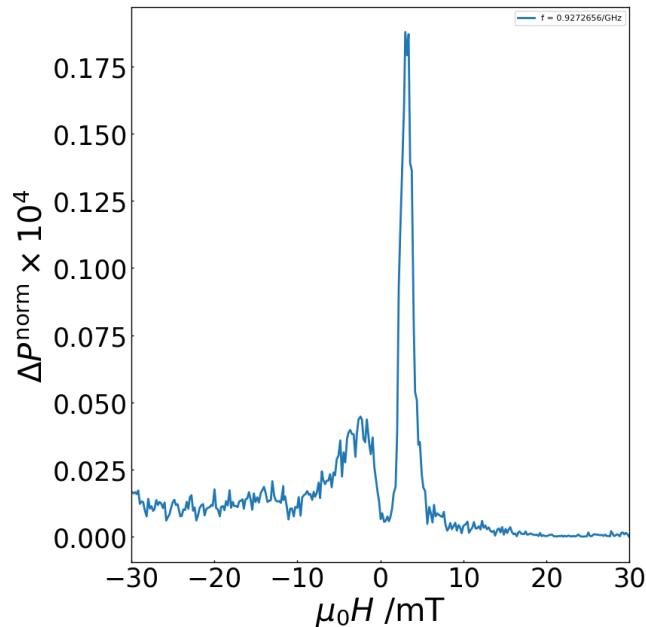


図 4.9 Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40) における共鳴周波数での  $\Delta P^{\text{norm}}$  の外部磁場依存性

図 4.8、図 4.9 でわかるように外部磁場  $\mu_0 H = \pm 2$  mT 付近でスピン波共鳴が見えていることがわかる。しかしその強度は磁場の正負で異なっており、この傾向は同じ試料を同様に複数回測定しても見られた。

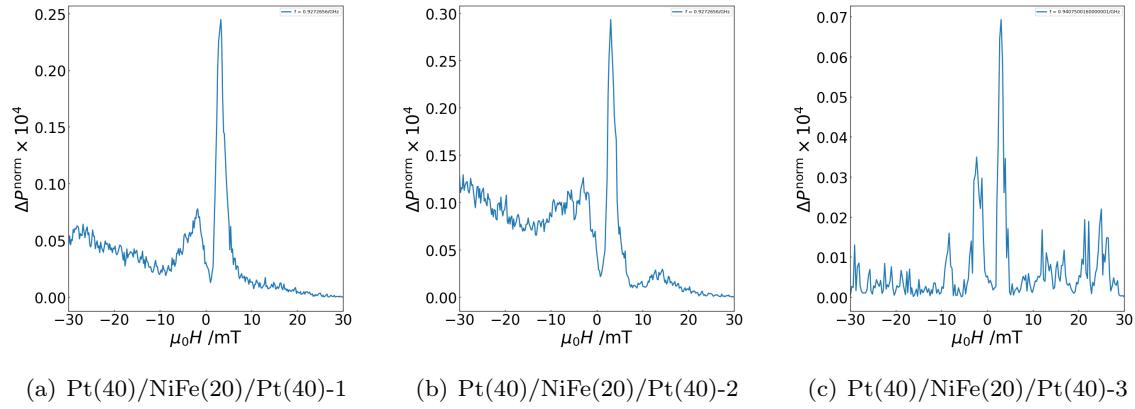


図 4.10 図 4.9 と同様のサンプルを複数回測定した結果

#### 4.2.2 Pt(6)/NiFe(20) の測定結果

外部磁場を  $\mu_0 H = 30$  mT 印加したときの Pt(6)/NiFe(20) での IFFT を施した時間領域信号とゲーティング処理後の周波数領域信号を図 4.11 に示す。

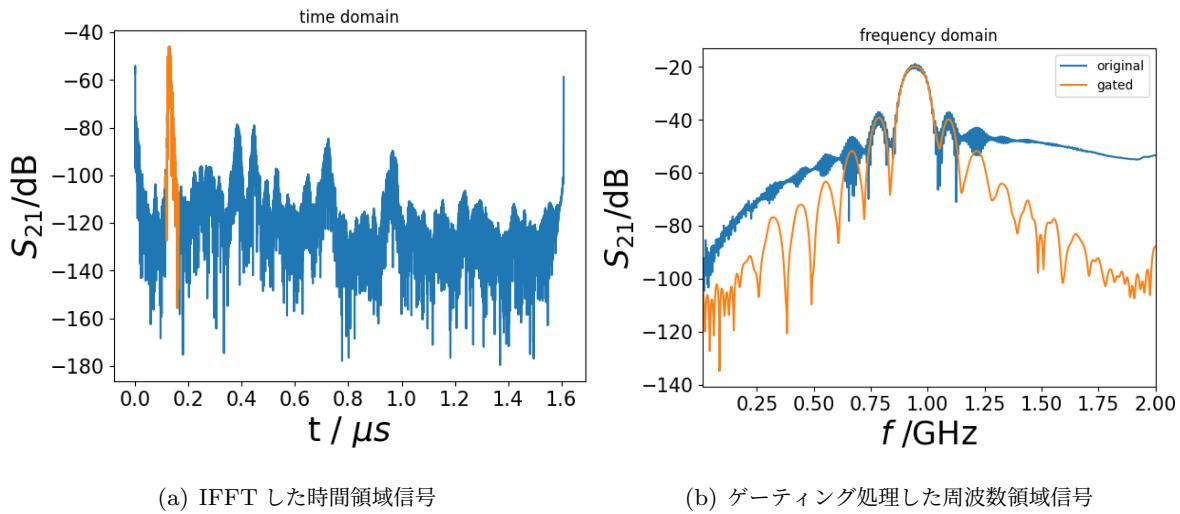


図 4.11 Pt(6)/NiFe(20) での  $S_{21}$  の測定結果 ( $\mu_0 H = 30$  mT)

共鳴周波数で  $S_{21} \simeq -20$  dB 付近で Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40) のときよりは大きな値が得られている。 $\Delta P^{\text{norm}}(f, H)$  を測定した結果を図 4.12 に示す。

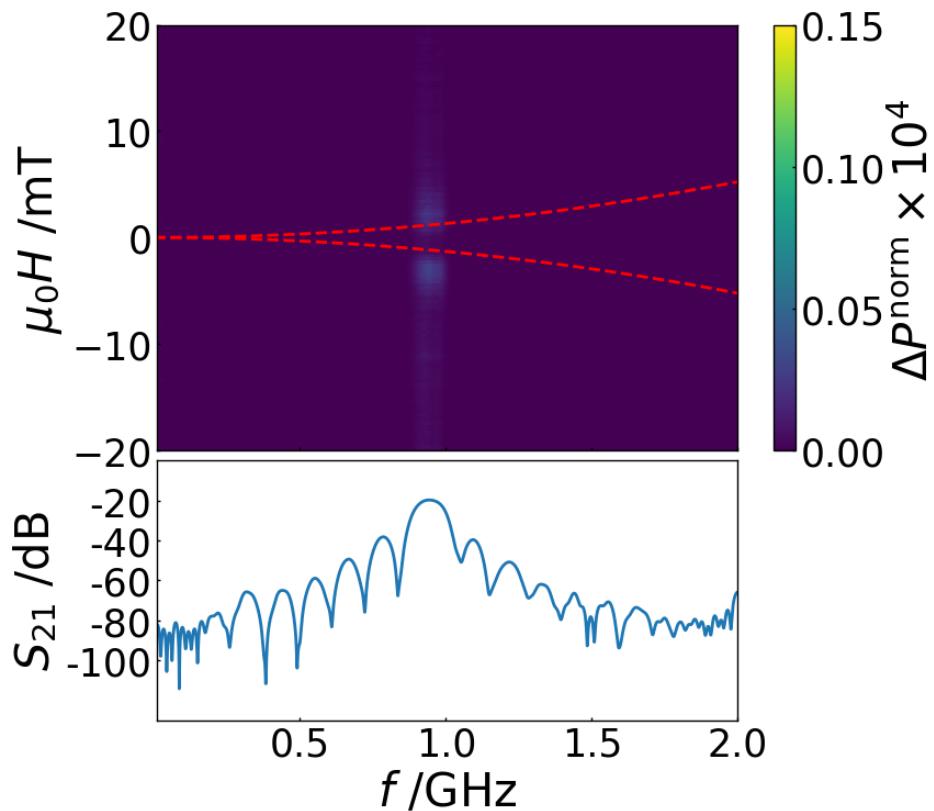


図 4.12 Pt(6)/NiFe(20) での  $\Delta P^{\text{norm}}$  の測定結果

図 4.12において共鳴周波数での断面をとった図が図 4.13である。

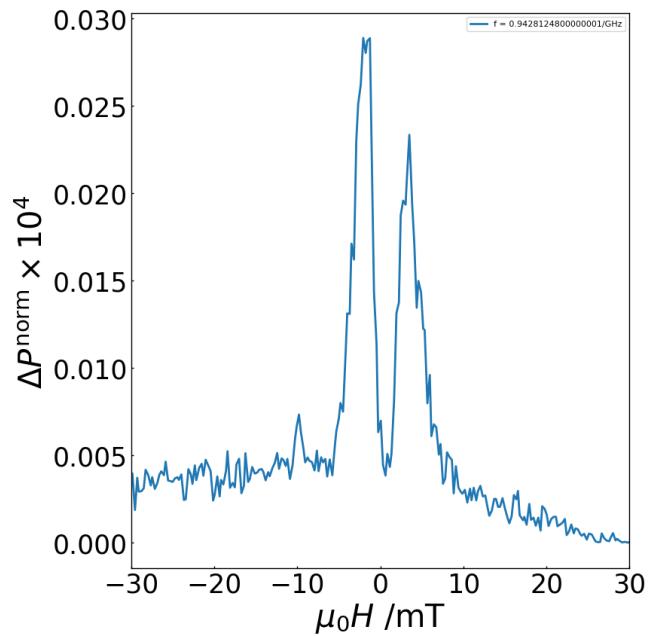


図 4.13 Pt(6)/NiFe(20) における共鳴周波数での  $\Delta P^{\text{norm}}$  の外部磁場依存性

図 4.12、図 4.13 をみると磁場の正負でほとんど同じような強度のピークが得られている。

#### 4.2.3 Mn(6)/NiFe(20) の測定結果

外部磁場を  $\mu_0 H = 30 \text{ mT}$  印加したときの Mn(6)/NiFe(20) での IFFT を施した時間領域信号とゲーティング処理後の周波数領域信号を図 4.14 に示す。

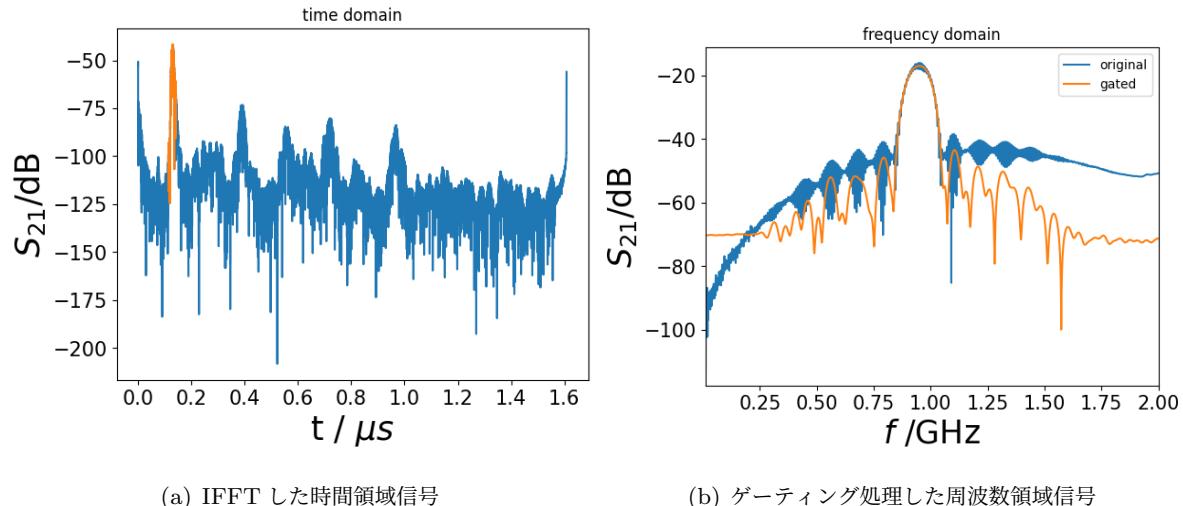


図 4.14 Mn(6)/NiFe(20) での  $S_{21}$  の測定結果 ( $\mu_0 H = 30 \text{ mT}$ )

ここでも Pt(6)/NiFe(20) のときと同じように共鳴周波数で  $S_{21} \simeq -20 \text{ dB}$  付近の大きな値が得られている。

$\Delta P^{\text{norm}}(f, H)$  を測定した結果を図 4.15 に示す。

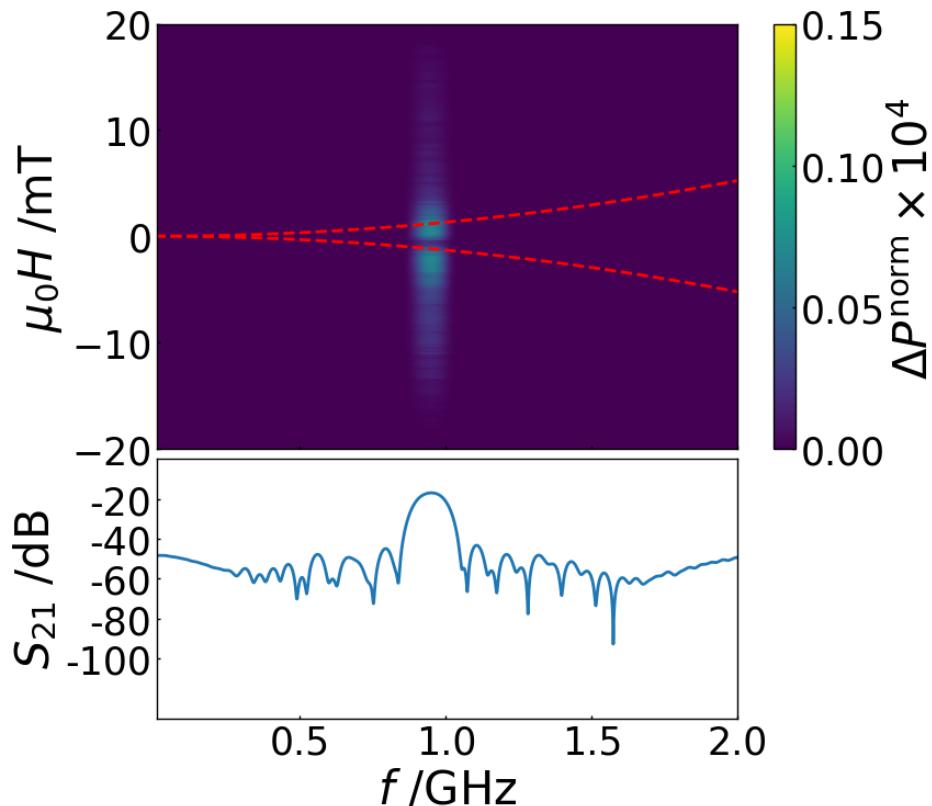


図 4.15 Mn(6)/NiFe(20) での  $\Delta P^{\text{norm}}$  の測定結果

図 4.15 において共鳴周波数での断面をとった図が図 4.16 である。

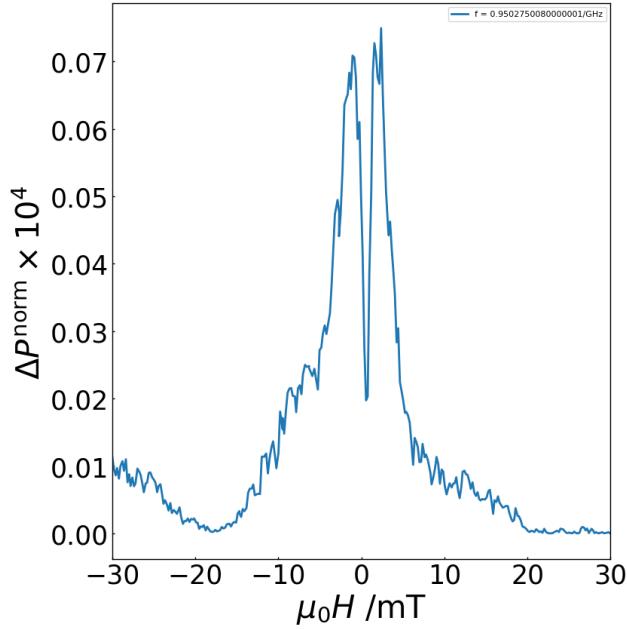
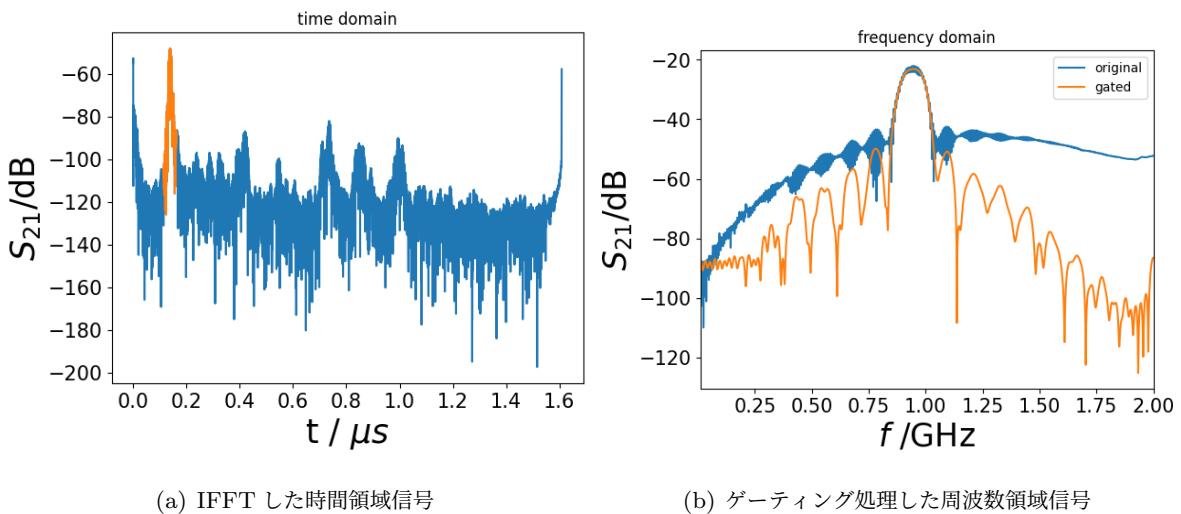


図 4.16 Mn(6)/NiFe(20) における共鳴周波数での  $\Delta P^{\text{norm}}$  の外部磁場依存性

図 4.15、図 4.16 をみると Pt(6)/NiFe(20) のときと同様に磁場の正負でほとんど同じような強度のピークが得られている。

#### 4.2.4 Pt(40)/NiFe(20)/Mn(40) の測定結果

外部磁場を  $\mu_0 H = 30 \text{ mT}$  印加したときの Pt(40)/NiFe(20)/Mn(40) での IFFT を施した時間領域信号とゲーティング処理後の周波数領域信号を図 4.17 に示す。



(a) IFFT した時間領域信号

(b) ゲーティング処理した周波数領域信号

図 4.17 Pt(40)/NiFe(20)/Mn(40) での  $S_{21}$  の測定結果 ( $\mu_0 H = 30 \text{ mT}$ )

ここでも共鳴周波数で  $S_{21} \simeq -20 \text{ dB}$  付近の大きな値が得られている。

$\Delta P^{\text{norm}}(f, H)$  を測定した結果を図 4.18 に示す。

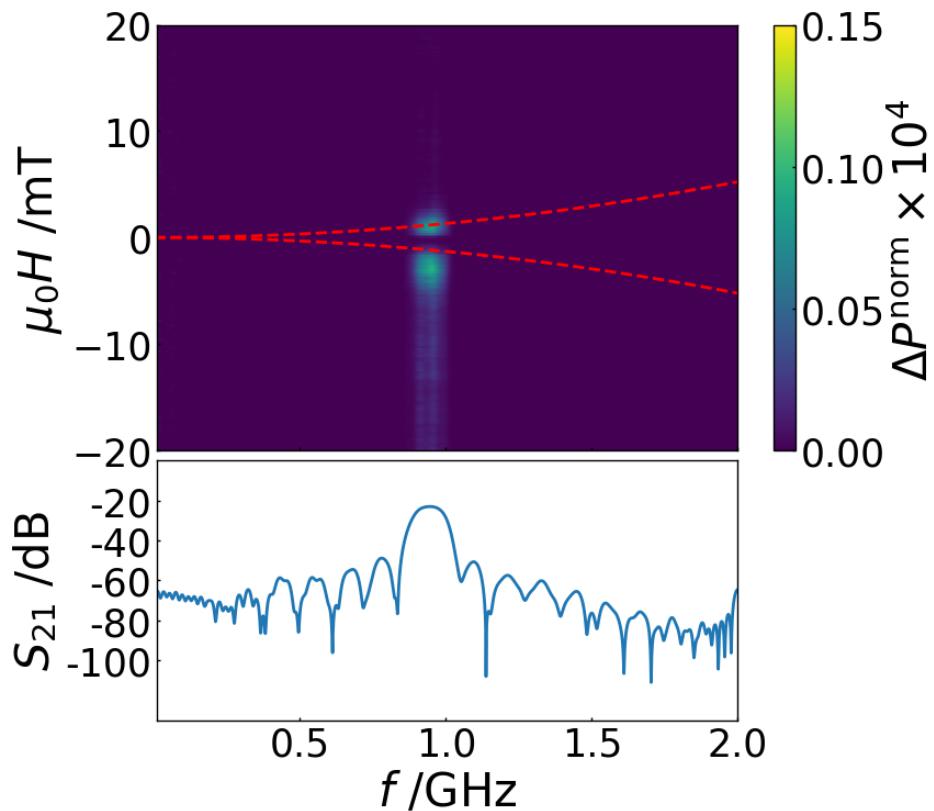


図 4.18 Pt(40)/NiFe(20)/Mn(40) での  $\Delta P^{\text{norm}}$  の測定結果

図 4.18において共鳴周波数での断面をとった図が図 4.19である。

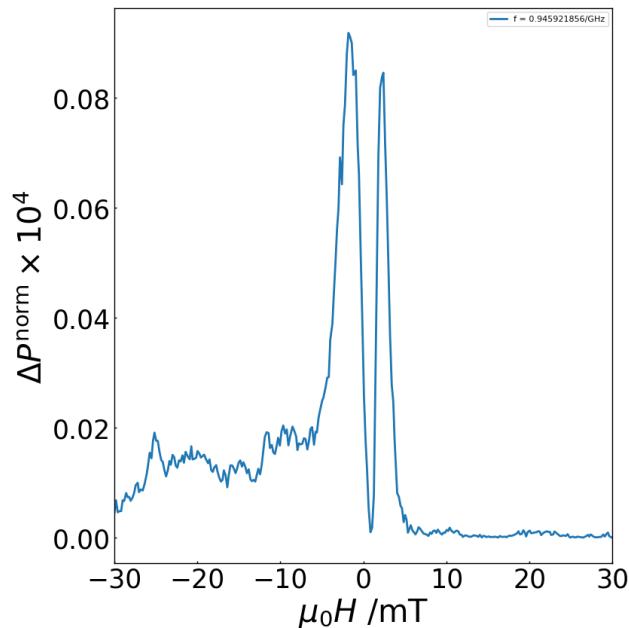


図 4.19 Pt(40)/NiFe(20)/Mn(40) における共鳴周波数での  $\Delta P^{\text{norm}}$  の外部磁場依存性

図 4.18、図 4.19をみると磁場の正負でほとんど同じような強度のピークが得られており、前の Pt(6)/NiFe(20)、Mn(6)/NiFe(20) のときよりも大きな  $\Delta P^{\text{norm}}$  の値が得られていることがわ

かる。

#### 4.2.5 NiFe(20) の測定結果

外部磁場を  $\mu_0 H = 30 \text{ mT}$  印加したときの NiFe(20) 単層での IFFT を施した時間領域信号とゲーティング処理後の周波数領域信号を図 4.20 に示す。

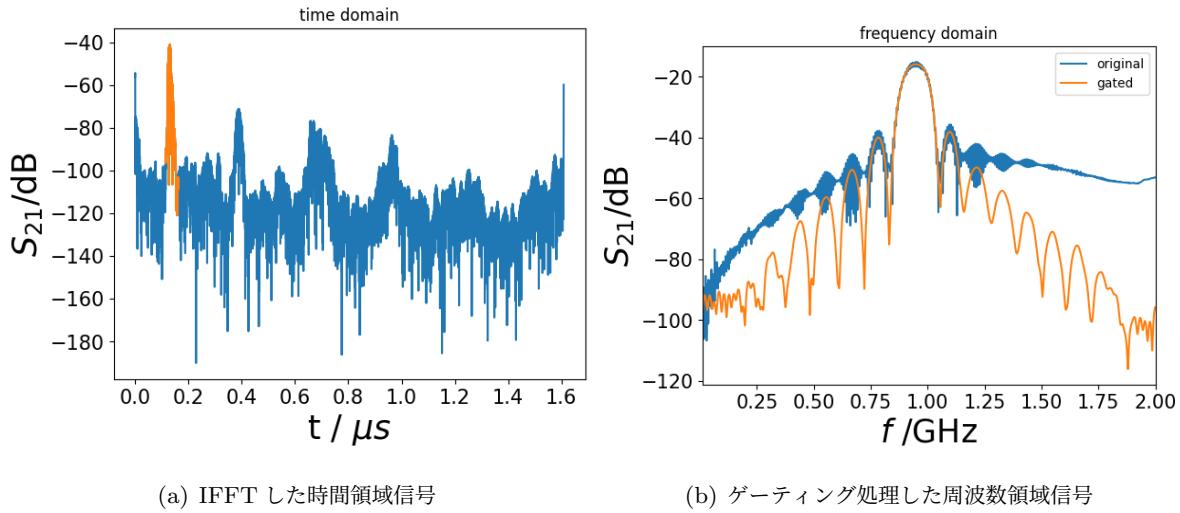


図 4.20 NiFe(20) での  $S_{21}$  の測定結果 ( $\mu_0 H = 30 \text{ mT}$ )

ここでも共鳴周波数で  $S_{21} \simeq -20 \text{ dB}$  付近の大きな値が得られている。

$\Delta P^{\text{norm}}(f, H)$  を測定した結果を図 4.21 に示す。

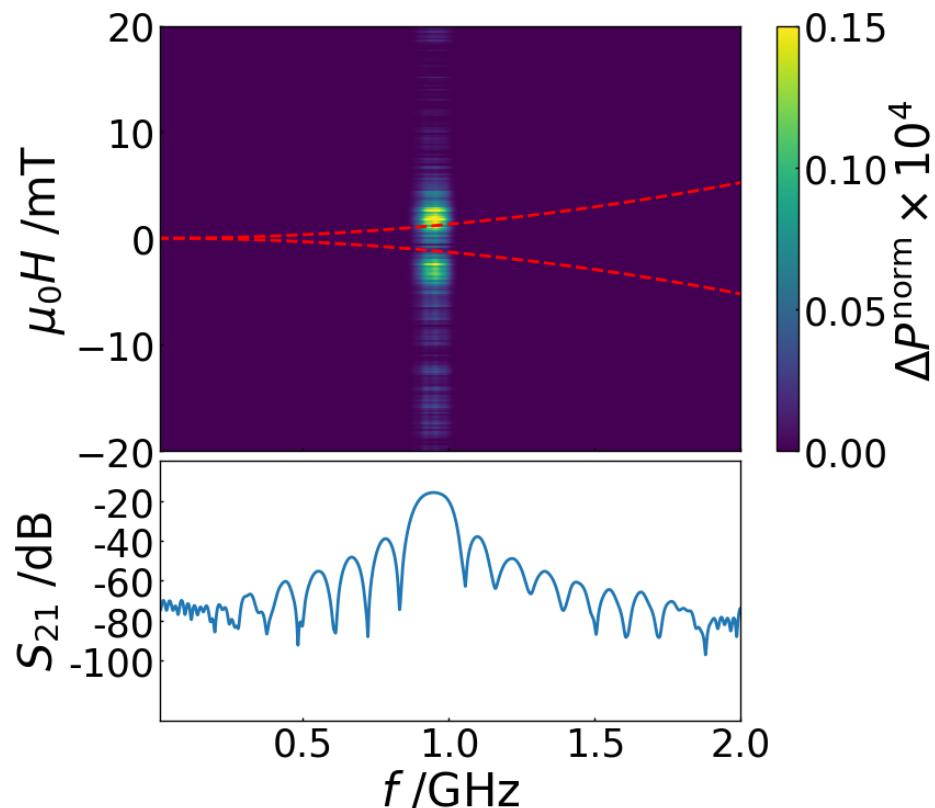


図 4.21 NiFe(20) での  $\Delta P^{\text{norm}}$  の測定結果

図 4.21 において共鳴周波数での断面をとった図が図 4.22 である。

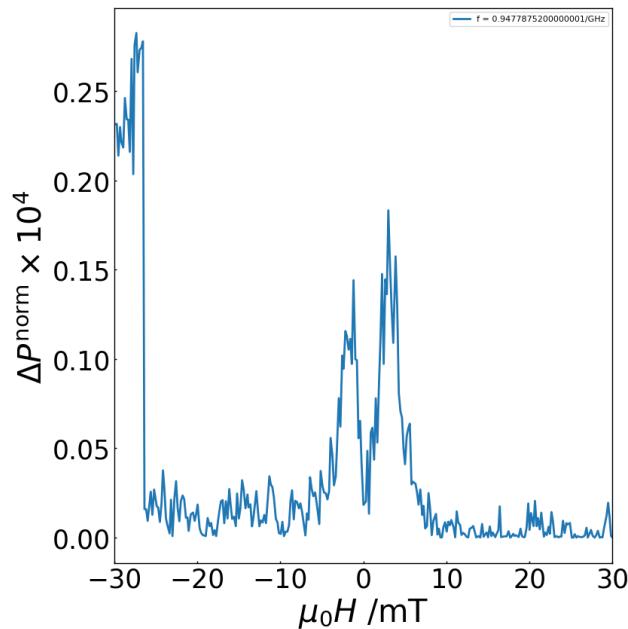


図 4.22 NiFe(20) における共鳴周波数での  $\Delta P^{\text{norm}}$  の外部磁場依存性

図 4.21、図 4.22 をみると他の試料に比べてノイズが大きいけれども外部磁場  $\mu_0 H = \pm 2 \text{ mT}$  程度でスピン波共鳴が観測できた。ただし、その  $P^{\text{norm}}$  の値は Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40) の試料を除いた他の試料よりも大きな値となっている。

### 4.3 層構成の違いによる STT-SWR 励起強度の比較

最後に測定した試料における  $\Delta P^{\text{norm}}$  のピーク値を図 4.9、図 4.13、図 4.16、図 4.19、図 4.22、の断面プロットからその左右のピーク及び平均ピークを算出して試料ごとにプロットした図が図 4.23 である。

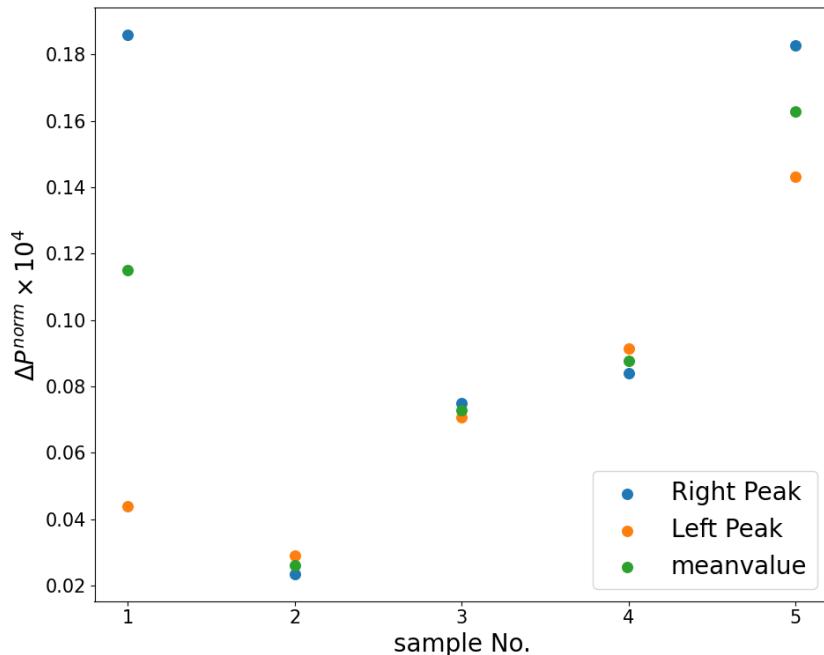


図 4.23 試料ごとの  $\Delta P^{\text{norm}}$  のピーク強度

ここで試料番号は表 4.4 のとおりである。

表 4.4 測定に使用した試料

試料番号	材料構成 (括弧内の数値は nm 表記の膜厚)
1	LiNbO <sub>3</sub> /Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40)
2	LiNbO <sub>3</sub> /Pt(6)/NiFe(20)
3	LiNbO <sub>3</sub> /Mn(6)/NiFe(20)
4	LiNbO <sub>3</sub> /Pt(40)/NiFe(20)/Mn(40)
5	LiNbO <sub>3</sub> /NiFe(20)

Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40) の試料で右側のピークと左側のピークの強度に差がある。また NiFe(20) 単層でのピーク強度が大きくなっていることがわかる。

## 第5章

### 考察

#### 5.1 Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40) と Pt(40)/NiFe(20)/Mn(40) の比較

本実験の目的である R-SAW によるスピン流生成機構におけるスピン軌道相互作用の寄与については図 4.23においてサンプル 1(Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40)) とサンプル 4(Pt(40)/NiFe(20)/Mn(40)) の結果をみると明らかになると思われるが、サンプル 1 の試料において左右のピーク、すなわち磁場の正負で異なる強度のピークが得られてしまったためにはっきりとスピン軌道相互作用の寄与について結論を述べることは難しい結果となった。もしスピン軌道相互作用の効果が R-SAW によるスピン流生成機構に寄与しているならば、スピンホール角の正負が異なる材料を積んだサンプル 4(Pt(40)/NiFe(20)/Mn(40)) の試料のほうがスピンホール角が正である Pt を上下に積んだサンプル 1(Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40)) の試料よりも大きなピーク強度が見えるはずであるが、平均値あるいは右側のピーク強度の値をみるとかぎり、そのようにはなっていない。逆に左側のピーク強度で比較するとスピン軌道相互作用が効いているかのような振る舞いに見える。

サンプル 1(Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40)) で見られたこのような磁場の正負でのピーク強度の違いは Shinozaki が測定した結果でも見られているがその結果は磁場の印加角度をスピン波の波数ベクトルの方向からずらした際に生じたものであり、本実験では磁場印加角度はスピン波と同じ方向にとっているので Shinozaki の測定した結果とは異なっているように見える [17]。この非相反性が生じてしまった原因としてはサンプルの NM、FM 層の膜がきれいに作製出来ていなかったということが考えられる。なぜならば今回作製した 5 つの試料のうち、このサンプル 1(Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40)) だけが磁性層の正方形が剥がれかかっており、アメーバ状になってしまっており、きれいな正方形で残っている他の試料では左右のピークがほとんど同じ強度で見えているからである。そのためにこれは材料に依存した本来の結果ではなく通常であれば左右で同じ強度のピークが得られるはずが何らかの要因で非相反な結果が得られてしまったと思われる。また図 4.7 からサンプル 1 (Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40)) の試料のみ他のサンプルと比較して共鳴周波数での  $S_{21}$  の値が小さい値となっていることもわかり、これは NM、FM 層合わせて 100 nm 積んでいて膜厚が厚いために SAW が潰れてしまったと考えることもできそうであるが、同じ膜厚で測定したサンプル 4(Pt(40)/NiFe(20)/Mn(40)) では  $S_{21}$  の大きさはそれほど小さくないないので、やはりサンプル 1(Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40)) の状態があまり良くなかったと思われる。

ただ、Shinozaki が測定した LiNbO<sub>3</sub>/NiFe(20)/Pt(40) のサンプルでの  $\Delta P^{\text{norm}} \times 10^4$  は 7.58 と大きな値をとっておりそれと比べると本実験で得られたサンプル 1(Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40)) での  $\Delta P^{\text{norm}} \times 10^4$  は 0.186 と小さな値をとっている。この結果だけみると上下を Pt で挟んだ

サンプル 1(Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40)) ではスピン流生成量が減少してスピン軌道相互作用が寄与していると結論づけることもできそうであるが、Shinozaki が測定したサンプルでは IDT の構造周期が  $3\text{ }\mu\text{m}$  で  $1.3\text{ GHz}$  の基本波を励起しており、本実験のサンプル 1(Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40)) で使用した IDT での基本波励起周波数  $0.92\text{ GHz}$  に比べて大きいものとなっている。スピン流生成量は (2.111)、(2.112) からわかるとおり  $\omega$  の 3 乗ないしは 4 乗に比例するのでその分大きく見積もられているという可能性もある。

## 5.2 Pt(6)/NiFe(20) と Mn(6)/NiFe(20) の比較

図 4.23 のサンプル 2(Pt(6)/NiFe(20)) とサンプル 3(Mn(6)/NiFe(20)) の結果を比較してみるとサンプル 3(Mn(6)/NiFe(20)) の試料のほうが  $\Delta P^{\text{norm}}$  の値が大きくなっている。ここで Mn と Pt の電気伝導度を比較すると表 5.1 に示したとおり Mn の方が電気伝導度が小さい。しかし (2.112) で示したように理論的にはスピン流は電気伝導度が大きいほど大きくなる。従って Mn をつかったサンプル 3(Mn(6)/NiFe(20)) のほうがサンプル 2(Pt(6)/NiFe(20)) よりも  $\Delta P^{\text{norm}}$  が小さくなると予想されるがそうなっていない。この原因のひとつとして考えられるのは Pt の中にカーボンが混ざってしまっていたということが考えられる。というのも蒸着器で Pt を蒸着する際に、カーボンハースと呼ばれる容器に Pt を入れてその容器の底に電子銃をあてて蒸着するのであるが、電子銃を当てる際の電流値が大きかったためにハースに穴が空いてしまっていた。そのため、実際に積まれていた材料にカーボンが混ざっているとしたらアモルファス状のカーボンは電気伝導度  $1 \times 10^3\text{ }\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$  と Mn よりもさらに小さいため、この結果の逆転を説明できる。

もしくは図 5.1 に示すように NM 層の膜厚がちょうど Mn の方がスピン流生成が大きくなる条件になっていたということも考えられる。NM 層の膜厚が薄い領域ではスピン流が生成される部分の体積が増えるためにスピン流が増大していくが、それ以上膜厚を大きくしてスピン拡散長よりも大きい膜厚にしてしまうとスピンの散乱によってスピン流が FM 層に到達しなくなってきてスピン流量が減少していく、Pt のスピン拡散長については表 5.1 に示したとおりで膜厚  $d = 6\text{ nm}$  よりも大きい。一方で Mn 単体のスピン拡散長は文献値を調べたが見つけることはできなかった。しかし Mn を含んだいくつかの合金でのスピン拡散長は表 5.1 のような値をとっており、例えばちょうど図 5.1 となるような状況を考えると、この膜厚  $d$  では Mn のスピン流の方が大きくなり、したがって  $\Delta P^{\text{norm}}$  もサンプル 2(Pt(6)/NiFe(20)) よりサンプル 3(Mn(6)/NiFe(20)) の方が大きくなっている状況が生じ得ると考えられる。

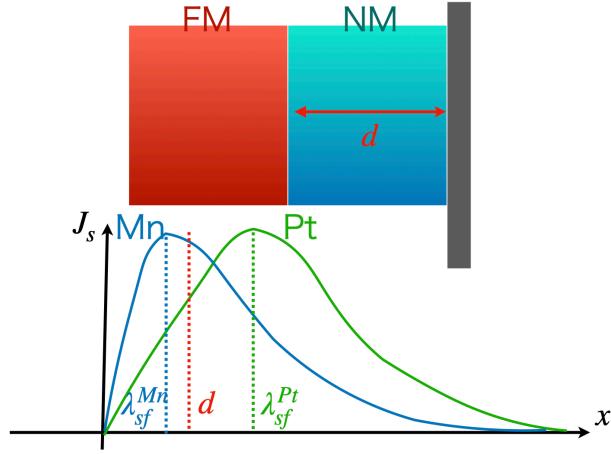


図 5.1 NM 層の膜厚と材料のスピン拡散長

表 5.1 Pt と Mn の材料特性

材料	電気伝導度 / $\Omega^{-1}m^{-1}$	スピン拡散長 /nm
Pt	$6.4 \times 10^6$ [1]	7 [1]
Mn	$6.9 \times 10^5$	0.5 ~ 1.8? [19]

### 5.3 NiFe(20) 単層とその他の試料の比較

最後に NiFe(20) 単層において  $\Delta P^{\text{norm}}$  が大きくなっていることについて考察する。先行研究 [7] によると NiFe(20) 単層での  $\Delta P^{\text{norm}}$  はスピン流生成層である NM 層を加えた場合に比べて小さくなっていた。しかし本実験で得られた結果はそれとは逆の結果を示している。先行研究と本実験で異なる部分は先行研究では基板の上に FM 層を積んでその上に NM 層を積んでいるのに対して本実験では逆に基板の上に NM 層を積んでその上に基板を積んでいることである。このように FM 層の下に別の非磁性体を敷くと下地効果 [4] によって FM 層の飽和磁化やダンピング定数といった磁気特性が変化しそれが何らかの形で影響を及ぼしていると考えることができる。

さらに先行研究と本実験で異なることとして、本実験で用いた IDT は構造周期が  $\lambda = 4\text{ nm}$  と大きく、励起される SAW の周波数が大きくなっているというのがある。先行研究でも NiFe(20) 単層で測定した結果があるが、このときの  $\Delta P^{\text{norm}} \times 10^4$  の値は 30 近くあり [7]、本実験で得られた 0.16 付近の値よりも非常に大きい。他の試料について測定した  $\Delta P^{\text{norm}}$  も本実験での値はどれも小さめであり、これはやはり SVC によるスピン流生成機構において (2.111) と (2.112) からわかるとおりスピン流は周波数の 3 乗ないしは 4 乗に比例するため、より大きい基本周波数モードでみたほうがそれだけ  $\Delta P^{\text{norm}}$  も大きな値で検出されると考えることができる。また高い周波数の波を励起させると (2.156) で表される分散関係からより高い磁場でスピン波共鳴が起こるようになることがわかり、そうすると FM 層の磁化も飽和しやすくなり、共鳴が見えやすくなると考えることができる。本実験で構造周期が  $\lambda = 8.16\text{ }\mu\text{m}$  の基本波でスピン波が見れなかったのはあまりにも共鳴周波数が小さくその分共鳴する磁場の大きさも小さいので磁化が飽和しきっていなかったと考えることができる。

## 第6章

# 結論と今後の展望

### 6.1 結論

本実験では R-SAW によるスピン流生成機構におけるスピン軌道相互作用の寄与をスピンホール角の正負が異なる材料を磁性層の上下に成膜した場合とスピンホール角がともに正である材料を磁性層の上下に成膜した場合で比較した結果をもとに調べようと試みたものの、後者のサンプルで磁場の正負による共鳴ピーク強度の差が大きく、スピン軌道相互作用の寄与に関する明確な結論を出すことはできなかった。

しかしこれまで観測することができていなかった基板の上に NM 層、その上に FM 層を成膜した試料でもスピン波共鳴を観測することができた。

### 6.2 今後の展望

今後の展望としてはまず試料サンプルの状態があまり良くなかった Pt(40)/NiFe(20)/Pt(40) の試料を再び作り直して本当に磁場の正負でピーク強度が異なるのかを検証する必要がある。また Mn のスピンホール角が負であることは文献値から得たものであるが、これは ST-FMR によって測定することができるので測定することと、Mn 単体でのスピン拡散長の文献値が見つけられたなかったのでこれも測る必要がある。またより高い周波数を用いたほうがスピン波共鳴を観測しやすいと思われる所以、IDT の高次モードを利用したスピン流生成についても実験していくことが今後の課題である。

# 参考文献

- [1] K. Ando, S. Takahashi, K. Harii, K. Sasage, J. Ieda, S. Maekawa, and E. Saitoh. Electric manipulation of spin relaxation using the spin hall effect. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 101, p. 036601, Jul 2008.
- [2] K Ando, S Takahashi, J Ieda, Y Kajiwara, H Nakayama, T Yoshino, K Harii, Y Fujikawa, M Matsuo, S Maekawa, and E Saitoh. Inverse spin-hall effect induced by spin pumping in metallic system. *Journal of applied physics*, Vol. 109, No. 10, pp. 103913–103913–11, 2011.
- [3] Stephen Blundell. *Magnetism in condensed matter*. Oxford master series in condensed matter physics. Oxford University Press, Oxford ;, 2001.
- [4] Fengxuan Han, Wei Du, Mengli Liu, Hua Su, Huaiwu Zhang, Bo Liu, Hao Meng, and Xiaoli Tang. Effects of ta and pt/ta seed layer on the thermal stability of cofeb/mgo perpendicular magnetic anisotropy film. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 906, p. 164298, 2022.
- [5] F. J Jedema, A. T Filip, and B. J van Wees. Electrical spin injection and accumulation at room temperature in an all-metal mesoscopic spin valve. *Nature (London)*, Vol. 410, No. 6826, pp. 345–348, 2001.
- [6] D. Kobayashi, T. Yoshikawa, M. Matsuo, R. Iguchi, S. Maekawa, E. Saitoh, and Y. Nozaki. Spin current generation using a surface acoustic wave generated via spin-rotation coupling. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 119, p. 077202, Aug 2017.
- [7] Yuki Kurimune. Master thesis. 2019.
- [8] Yuki Kurimune, Mamoru Matsuo, Sadamichi Maekawa, and Yukio Nozaki. Highly non-linear frequency-dependent spin-wave resonance excited via spin-vorticity coupling. *Phys. Rev. B*, Vol. 102, p. 174413, Nov 2020.
- [9] L. D. Landau and E. M. Lifshitz. *Theory of elasticity*. Addison-Wesley physics books LCA:130. Pergamon Press, London, 1959.
- [10] M. Matsuo, Y. Ohnuma, and S. Maekawa. Theory of spin hydrodynamic generation. *Phys. Rev. B*, Vol. 96, p. 020401, Jul 2017.
- [11] Mamoru Matsuo, Jun'ichi Ieda, Kazuya Harii, Eiji Saitoh, and Sadamichi Maekawa. Mechanical generation of spin current by spin-rotation coupling. *Phys. Rev. B*, Vol. 87, p. 180402, May 2013.
- [12] Akiyo Nomura, Takaharu Tashiro, Hiroyasu Nakayama, and Kazuya Ando. Temperature dependence of inverse rashba-edelstein effect at metallic interface. *Applied physics letters*, Vol. 106, No. 21, pp. 212403–, 2015.

- [13] Michael E. Peskin. *An Introduction To Quantum Field Theory*. Frontiers in Physics. CRC Press, Boca Raton, FL, first edition. edition, 2018.
- [14] Maekawa Sadamichi, Sergio O. Valenzuela, Saitoh Eiji, and Kimura Takashi. *Spin current*. Series on semiconductor science and technology ; 22. Oxford University Press, Oxford, second edition. edition, 2017.
- [15] Keiji Saito. fluid and elastic mechanics lecture note. 2022.
- [16] E Saitoh, K Uchida, S Takahashi, K Harii, J Ieda, W Koshibae, K Ando, and S Maekawa. Observation of the spin seebeck effect. *Nature (London)*, Vol. 455, No. 7214, pp. 778–781, 2008.
- [17] Ryo Shinozaki. Master thesis. 2023.
- [18] R Takahashi, M Matsuo, M Ono, K Harii, H Chudo, S Okayasu, J Ieda, S Takahashi, S Maekawa, and E Saitoh. Spin hydrodynamic generation. *Nature physics*, Vol. 12, No. 1, pp. 52–56, 2016.
- [19] Wei Zhang, Matthias B. Jungfleisch, Wanjun Jiang, John E. Pearson, Axel Hoffmann, Frank Freimuth, and Yuriy Mokrousov. Spin hall effects in metallic antiferromagnets. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 113, p. 196602, Nov 2014.
- [20] 齊藤英治, 村上修一. スピン流とトポロジカル絶縁体 : 量子物性とスピントロニクスの発展. 基本法則から読み解く物理学最前線 ; 1. 共立出版, 東京, 2014.
- [21] 松尾衛. 相対論とゲージ場の古典論を噛み碎く : ゲージ場の量子論を学ぶ準備として. 現代数学社, 京都, 2019.
- [22] 松尾衛, 齊藤英治, 前川禎通. 非慣性系のスピントロニクス. *Nihon Butsuri Gakkaishi*, Vol. 72, No. 9, pp. 641–648, 2017.
- [23] 太田恵造. 磁気工学の基礎. I, 磁気の物理. 共立全書 ; 200. 共立出版, 東京, 1973.
- [24] 太田恵造. 磁気工学の基礎. II, 磁気の応用. 共立全書 ; 201. 共立出版, 東京, 1973.
- [25] 金森順次郎. 磁性. 新物理学シリーズ ; 7. 培風館, 東京, 1969.

# 謝辞

本研究を行うにあたって、大変多くの方々に協力していただきました。心より感謝します。

慶應義塾大学理学部物理学科 能崎幸雄教授には本研究のテーマを提示していただき、私の実験の計画が何かと後ろだおしになってしまふことが多かったにもかかわらず、寛容に接していただき、かつディスカッションの際にはスピントロニクスの物理に関する多くの助言を頂きました。良い研究環境を与えて頂き深く感謝申し上げます。

慶應義塾大学理学部物理学科 山野井一人助教には三年生の磁性に関する物理学セミナーの授業のころからマンツーマンで磁性に関して多くのことを教えて頂き、研究室に配属後も居室に常にいらっしゃって実験データを見てもらって助言を頂いたり、研究についての多くのことを学ばせて頂きました。心より感謝申し上げます。

慶應義塾大学理学部物理学科 船戸匠特任助教には論文購読発表の際から気にかけていただき、大学院進学に関する進路相談などにも乗ってください、なにより研究とは直接関係のない個人的な物理の勉強の議論に付き合っていただき、大学院でも頑張ろうと、とてもよい刺激を頂きました。心より感謝申し上げます。

慶應義塾大学理学部物理学科 洞口泰輔特任助教には主に装置の使い方について多くのことを教えていただき、安心して研究を進めることができました。深く感謝申し上げます。

修士課程 2 年の篠崎涼さんには表面弾性波をつかった実験に関して装置の扱い方や実験データの解析の方法など多くのことを教えていただき、実験していく中で生じた細かい疑問点にも丁寧に答えていただきました。深く感謝いたします。

修士課程 1 年の中山颯人さんには年始の忙しい時期に装置の使い方などを教えていただきたり、ときおり私が実験していく中で困ったときに声を掛けると気さくに対応してくださいって非常に助かりました。深く感謝いたします。

そして同期である阿部広也くんと佐々木良輔くんとは研究室内で雑談したり一緒に昼食を食べたりと共に楽しく多くの時間を過ごすことが出来ました。実験がうまく行かなくて失敗が続いてたり、おもうような測定結果がでなくて苦痛だったときも同期がいたから楽しく生活することができました。心より感謝します。

最後に本学に通わせていただき、大学生活を様々な面で陰ながら支えていただいた両親に深く感謝申し上げます。