	うめ つ のぶ ゆき
氏　　名	梅 津 信 之
授 与 学 位	博士（工学）
学位授与年月日	平成２７年３月２５日
学位授与の根拠法規	学位規則第４条第１項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）応用物理学専攻
学位論文題目	不均一スピンダイナミクスにおける磁気緩和の理論研究
指 導 教 員	東北大学教授　佐久間　昭正
論文審査委員	主査　東北大学教授　佐久間　昭正　東北大学教授　安藤　康夫
	東北大学教授　北上　修　東北大学教授　佐々木　一夫

論 文 内 容 要 旨

磁気工学分野の重要課題の一つにスピン動力学の微視的理解があり，特に磁気記録デバイスにおける磁気緩和現象の機構解明が強く望まれている．

一般に，バルク磁性体の磁気緩和はスピン軌道相互作用によるスピン依存散乱に起因すると考えられており，多くの理論研究では磁化の一斉回転運動を仮定した計算が行われている．しかし，デバイスで用いられる磁性多層膜やナノ磁性体では，界面効果や有限サイズ効果が引き起こす磁化構造の空間依存性によって各磁化の回転位相がずれて不均一に運動していると予想される．特に強磁性金属では，電子の伝導性が磁化同士の相互作用に深く結びついているため，このような不均一ダイナミクスは磁気緩和現象に大きな影響を与えると考えられる．実際に強磁性共鳴実験によって，有限サイズ効果に起因するスピン波の固有モードの違いが磁気緩和定数の測定値に影響を与えることが示されている．この結果は不均一スピンダイナミクスに伴うスピン拡散を反映していると考えられ，Tserkovnyak 等の理論予測を実証しているように見える．ただし，この先行研究では磁気緩和の主要起源であるスピン軌道相互作用が考慮されておらず，磁気緩和機構の全体像を把握する上でこれを考慮することが必要不可欠であると考える．

本研究の目的は，強磁性金属のスピンダイナミクスに対し不均一スピンダイナミクスまで包括した統一的理論を構築することである．先行研究で考慮されなかった不均一スピンダイナミクスにおけるスピン軌道相互作用の影響，即ちスピンミキシング効果について詳細な議論を与えている点が本研究のオリジナリティである．ただし，物質中における原子由来のスピン軌道相互作用を理論的に扱うのは困難であるため，本研究では 2 次元電子系に一様電場を印加することで発生する Rashba スピン軌道相互作用モデルを用いている．

線形応答理論から微小な磁化振動を外場として，伝導電子が磁化に与えるスピントルクを計算することができる．スピントルクは RKKY 相互作用を意味する静的部分と，それ以外の動的部分に分けられる．動的部分はある磁化と別の磁化の速度成分の相互作用を意味しており，磁気緩和項もこの中に含まれる．本研究ではこの動的部分について，クリーンリミットに対する解析解の結果と不純物散乱を考慮した場合の数値計算結果を与える．不純物散乱は電子と非磁性

不純物の短距離相互作用によって生じるものと仮定し，第1Born近似の範囲で考慮している．計算にはGreen関数法を用い，スピン流保存則を満たすように梯子型のバーテックス補正を考慮して数値計算を行っている．磁化運動を波数ベクトル $\boldsymbol{q}$ で進行する平面波で展開し，主に $\boldsymbol{q}$ 依存性に対する計算結果の考察を行った．

スピントルクの動的部分は規格化された磁化ベクトル $\boldsymbol{n}$ を用いて，緩和項（$\alpha^{\mathrm{I}}\boldsymbol{n}\times\dot{\boldsymbol{n}}$），歪曲項（$\alpha^{\mathrm{II}}\boldsymbol{n}\times\hat{R}\,\dot{\boldsymbol{n}}$），くりこみ項（$\alpha^{\mathrm{III}}\dot{\boldsymbol{n}}$）の三つに分類されることが明らかとなった．ここで $\hat{R}$ は $\boldsymbol{q}$ に関する鏡映操作行列であり，図1に緩和トルクと歪曲トルクの方向を示した．緩和項は通常のGilbert緩和であり，磁化の横成分を縮める方向に作用するトルク項である．歪曲項はRashbaスピン軌道相互作用系に特有の項であり本研究によって初めて見出されたトルク項である．この項はスピン軌道相互作用が存在し，且つ不均一スピンダイナミクス（$q\neq 0$）の場合にのみ発生することが計算によって示され，特定の方向を持ったスピン波の存在がもたらす対称性の破れに起因していると言える．最後のくりこみ項は磁化の運動方程式全体を補正する項であるが，不純物散乱効果によってその補正は無視できるほど小さいことを数値計算によって確認している．

緩和項の係数である α^{I} の波数依存性の計算結果を図2に示す．エネルギーバンドに対しエネルギーの大きい方のバンド指数を+，小さい方を－と表すことにし，各バンド指数に対応するFermi球の半径を $k_{\pm}$ と書く．このとき，クリーンリミットでは，α^{I} は $q=0,\ k_{-}\pm k_{+},\ 2k_{\pm}$ で発散することが解析的に示される（図2の破線）．これらの場合はスピン波の運動量によって平行移動したFermi球同士が互いに接する状況に対応しており，2次元系のネスティング効果が強く反映されていることを意味している．スピン軌道相互作用が存在しない系では，$q=k_{-}\pm k_{+}$ でのみ発散することが先行研究によって示されていたが，スピン軌道相互作用系ではこれに加えて $q=0,2k_{\pm}$ で発散することになる．この結果の違いは，スピン軌道相互作用系においてバンド間遷移に加えてスピンミキシング効果によるバンド内遷移が存在することに起因している．特に，長波長領域ではスピン軌道相互作用系でのみ緩和が存在するという点が重要である．続いて，不純物散乱の影響に着目してみよう．図2より電子寿命の減少が α^{I} のピーク値を小さくしているのがわかる．この結果から，ネスティング効果は不純物散乱によって抑制されると結論付けられる．これは自己エネルギーの発生に伴うFermi球のぼやけが原因であると解釈される．一斉回転系（$q=0$）では，不純物散乱によって α^{I} が有限の値に抑制されることも確認しており，先行研究の示す結果と一致している．

歪曲項の係数である α^{II} の波数依存性の計算結果を図3に示す．クリーンリミットでは，α^{II} は α^{I} と同様の波数で発散することが解析計算によって示される．バンド内遷移のみ存在する $0<q<k_{-}-k_{+}$ と $k_{-}+k_{+}<q<2k_{-}$ では，$\alpha^{\mathrm{I}}=\alpha^{\mathrm{II}}$ であることが示されるが，この結果はバンド内遷移における電子と正孔のFermi球半径同士が等しいことと，ネスティングポイントにおける各スピンのz成分が等しいことに起因している．それ以外の範囲ではこれらの条件が破れてしまうため $\alpha^{\mathrm{I}}\neq\alpha^{\mathrm{II}}$ となってしまうが，これはRashba系のスピン状態が波数ベクトルに依存していることによる結果である．α^{II} に対するバンド間遷移の寄与は負の値をとるため，バンド間遷移の寄与がバンド内遷移の寄与を超えると α^{II} 自体がマイナスになることを確認している．不純物散乱の影響について着目してみると，α^{I} の場合と同様に α^{II} に対してもネスティング効果による発散が電子寿命の減少により抑えられているのが確認できる．$q=0$

では不純物のあるなしにかかわらず α^{II} はゼロであるが, クリーンリミットでは $q \to 0$ とすると α^{II} が発散するので非物理的な不連続性を示す. しかし, 不純物が考慮されることでこの不連続性は解消され, 電子寿命の減少と伴に $q = 0$ 付近のピークが短波長側へシフトしていくことが明らかとなった.

調和振動的な時間依存性を有する平面波磁場 $\boldsymbol{h}(\sim \mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t})$ を Rashba スピン軌道相互作用系に印加した場合，磁化振動の固有モードは $n_{\pm} = \chi_{\pm} h_{\pm}$を解くことで得られる．固有モードは $n_{\pm} = \cos(\omega t) \pm \mathrm{i}\sin(\omega t) \mp \mathrm{i}\sin(\omega t + \sin 2\theta_q)$, 帯磁率は$\chi_{\pm} = \gamma/(\gamma H^z \mp \mathrm{i}\alpha^{\mathrm{I}}\omega)$と求まる．ここで $\theta_q = \arctan(q_y/q_x)$である．$n_{\pm}$ は磁化の振動モードが楕円形の軌跡を描くことを意味している. α^{II} の絶対値が大きいほど楕円率は大きく, α^{II} が正のときに楕円の長軸と $\boldsymbol{q}$ は平行, 負のときに長軸と $\boldsymbol{q}$ は直交する．一方で帯磁率に着目すると，$\chi_{\pm}$の表式には α^{II} が反映されていないのが見てとれる．このことから，α^{II} は α^{I} と違って強磁性共鳴実験で行われるように，線幅から見積もることはできないと結論付けられる．歪曲項の存在を確認するには，磁化ダイナミクスの直接観測が必要であると言える．

磁化ダイナミクスの時間依存性を検知する方法として TRMOKE (time resolved magnetic optical Kerr effect) が挙げられる．これは，ポンプ光で励起した磁化ダイナミクスにプローブ光を当て，磁気光学 Kerr 効果によって磁化成分を測定する方法である．これを用いれば歪曲項の観測は原理的に可能である．しかし，現時点では技術的に解決しなければならない問題がいくつか残っている．楕円軌道の観測にはある程度の大きさの α^{II} が必要である．図 3 の $\hbar/\tau = 0.01\epsilon_{\mathrm{F}}$ の結果からすると, $q \simeq 0.12k_{\mathrm{F}} \simeq O(10^{-1})\text{Å}^{-1}$ のとき α^{II} は最大値 0.13 をとり観測に十分な大きさをとると言える．しかし，このときのスピン波の波数は Brillouin 光散乱実験で制御できる 0.01Å^{-1} を一桁程度超えるため，スピン波を誘起することは実験的に難しいと考えられる．また，このような波数で運動するスピン波の各楕円軌道を観測するにはおよそ数 nm オーダーのスポットサイズが求められるが，TRMOKE のスポットサイズの現行値は $10\mu\mathrm{m}$ であり実験の実現はかなり厳しい．歪曲項の存在が実験によって証明されることが強く望まれるが，そのためには実験技術の向上と斬新な計測手法の開発が必要不可欠であると言える．

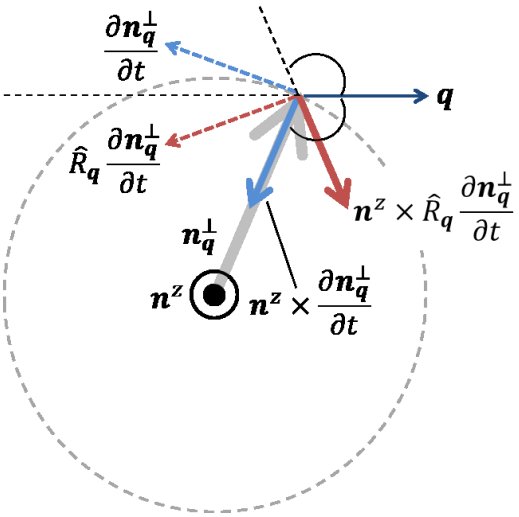


図 1　緩和トルク（青）と歪曲トルク（赤）

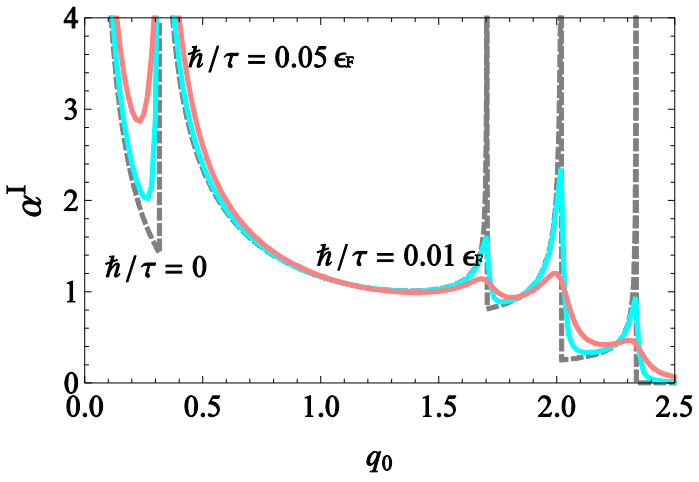


図 2　α^{I} の波数依存性（$q_0 = q/k_F$）

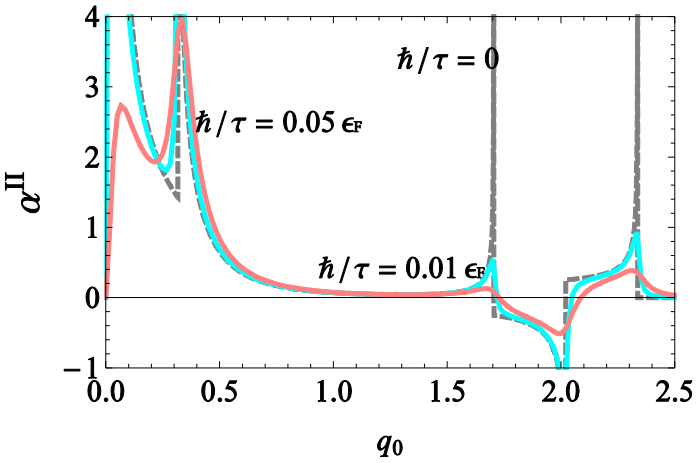


図 3　α^{II} の波数依存性（$q_0 = q/k_F$）

論文審査結果の要旨

磁気工学分野の重要課題の一つにスピン動力学の微視的理解があり，特に磁気記録デバイスにおける磁気緩和現象の機構解明が強く望まれている．

一般に，バルク磁性体の磁気緩和はスピン軌道相互作用によるスピン散乱に起因すると考えられており，多くの理論研究では磁化の一斉回転を仮定した計算が行われている．しかし，デバイスで用いられる磁性多層膜やナノ磁性体では，磁化構造の空間依存性によって各磁化の回転位相がずれて不均一に運動していると予想される．特に強磁性金属では，電子の伝導性が磁化同士の相互作用に深く結びついているため，このような不均一ダイナミクスは磁気緩和に大きな影響を与えると考えられる．実際に強磁性共鳴実験によって，有限サイズ効果に起因するスピン波の固有モードの違いが磁気緩和定数の測定値に影響を与えることが示されており，磁気緩和現象のスピンダイナミクス依存性が示唆されている．

本研究の目的は，強磁性金属のスピンダイナミクスに対し不均一スピンダイナミクスまで包括した統一的理論を構築することである．モデルはRashbaスピン軌道相互作用を考慮した2次元電子系であり，磁化の運動方程式を線形応答理論に基づいて微視的に導出している．得られたスピントルク項に含まれる時間微分項について，磁化が平面波で伝搬する際の波数ベクトル依存性を計算し，スピン軌道相互作用の効果と不純物散乱の影響について考察を行っている．

計算の結果，時間微分を含むトルク項は従来のGilbert型緩和項と歪曲項に分類できることがわかった．歪曲項はスピン軌道相互作用と不均一スピンダイナミクスが両方考慮されている系でのみ発生し，本研究によって初めて見出されたトルク項である．緩和項と歪曲項の波数依存性は，ともにスピン励起（電子正孔対生成）に伴うネスティング効果を反映しており，各トルクの大きさは電子バンドと正孔バンドのFermi球が接するときに発散することが示される．先行研究によって，不純物のない一斉回転系における磁気緩和はスピン軌道相互作用によって発散することが知られているが，この結果は本研究により，バンド内遷移に起因したネスティング効果が原因であると解釈できる．不純物散乱を考慮した数値計算の結果からは，有限の電子寿命に起因するバンドのぼやけ効果がネスティング効果を抑制することを確認している．

歪曲項は緩和項と異なり，波数ベクトルの絶対値だけではなく角度方向にも依存していることを示した．歪曲項の係数が正の値を持つ場合は，磁化の歳差運動は波数ベクトルと平行方向に長軸を持つ楕円軌道の軌跡を描くことになる．歪曲項の存在を実験によって観測するためには磁化運動の時間依存性を直接検知するTRMOKE (time-resolved magneto optical Kerr effect) が有力であると考えられるが，現状のスポットサイズを10μmから数nmオーダーへ改良する必要があることを示した．このため，理論研究の立場からは歪曲項のデバイス応用を見据えた新たな実験方法の提案が必要であると言える．

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。