領域略称名：スピン流
領 域 番 号：469

平成２３年度科学研究費補助金
「特定領域研究」に係る研究成果等の報告書

「スピン流の創出と制御」

（領域設定期間）
平成１９年度～平成２２年度

平成２３年６月

領域代表者　東北大学・金属材料研究所・教授・高梨弘毅

目 次

１． 研究領域の目的及び概要 3

２． 研究領域の設定目的の達成度 4

３． 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況 5

４． 主な研究成果 6
（１）研究項目 A01：スピン源の探索・創製 6
（２）研究項目 A02：スピン流とナノヘテロ構造 8
（３）研究項目 A03：スピン流と光物性 10
（４）研究項目 A04：スピン流と電子物性 12
（５）研究項目 A05：スピン流と機能・制御 14

５． 研究成果の取りまとめの状況 17

６． 研究成果の公表の状況 18
（１）主な論文等一覧 18
（２）ホームページについて 24
（３）公開発表について 24
（４）「国民との科学・技術対話」について 26

７． 研究組織と各研究項目の連携状況 27

８． 研究費の使用状況 31

９． 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度 32

１０． 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況 33

１１． 総括班評価者による評価の状況 34

１． 研究領域の目的及び概要

研究領域名：スピン流の創出と制御
研究期間　：平成１９～２２年度
領域代表者：東北大学・金属材料研究所・教授・高梨弘毅
補助金交付額（千円）：

平成１９年度	187,200（計画：187,200）
平成２０年度	273,800（計画：249,800；公募：24,000）
平成２１年度	269,600（計画：244,700；公募：24,900）
平成２２年度	220,600（計画：197,500；公募：23,100）
総計	951,200（計画：879,200；公募：72,000）

目的及び概要：

磁気特性、電気特性、光学特性などの物理量は元来独立なものであるが、材料がナノスケール化するとお互いに強く相関を持つようになり、相互に変換できるようになる、言い換えれば一方によって一方を制御できるようになる。このことは、スピントロニクス研究の発展の中で、金属や半導体といった従来の枠組みを超えて、共通して持たれるようになった認識である。そして、これらの相互変換・制御における最も基礎になる概念として、スピンの流れ、すなわち「スピン流」が注目されるようになった。電荷の流れである電流とは異なり、スピン流は角運動量の流れであり、角運動量の授受を通して変化する。一般的にスピンの注入あるいは蓄積という現象を通して生成したスピン流は、緩和と拡散を通して消滅する。スピン流の生成と消滅は他の物理量との変換を伴うので、適当な物理信号（磁気、電気、光学的信号など）によってスピン流を制御することができ、逆にスピン流によって物理信号の制御をすることもできる。スピン流の性質を明らかにすることは、同時に物理量の相互変換・制御のメカニズムを明らかにすることであり、それはスピントロニクスに格段の発展をもたらすとともに、さらに新しい物理現象や新しいデバイスにつながっていくことが期待できる。本特定領域は、スピン流の生成と消滅、そしてそれらを通して生じる物理信号との変換・制御に関する学理を確立し、電流とは異なるスピン流固有の属性に基づく新規な機能性の探求とデバイス応用を目的として設定された。

この目的を遂行するため、本特定領域では、内容を①スピン流の創出、②スピン流と物性、③スピン流と機能制御、の３つに区分し、さらに①と②をそれぞれ２つの小グループに分け、以下に示すA01~A05の５つの研究項目を設定した。そして、金属と半導体、あるいは物理学、材料学、電子工学といった既存分野の枠組みを超えた連携組織によって研究を推進した。

①「スピン流の創出」グループ

A01. スピン源の探索・創製

スピン流の元となるスピン源（材料および構造）の探索と創製を行った。

A02. スピン流とナノヘテロ構造

スピン源から効率よくスピン流を抽出・生成するための原理と、ナノヘテロ構造や界面制御に関する研究を行った。

②「スピン流と物性」グループ

A03. スピン流と光物性

スピン流と光との相関によって生じる諸物性の研究を行った。

A04. スピン流と電子物性

スピン流と電流や磁気モーメントとの相関によって生じる諸物性の研究を行った。

③「スピン流と機能・制御」グループ

A05. スピン流と機能・制御

スピン流に関わるさまざまな物理的信号の制御や変換に基づく機能性やデバイス応用に関する研究を行った。

２． 研究領域の設定目的の達成度

本特定領域の設定以降、スピン流、特に電流を伴わない純粋なスピン流に関して、多くの新しい発見があり、その創出と制御に関する理解が格段に進んだ。「スピン流の創出と制御」の学理に関わる顕著な成果として、

- 電流⇔スピン流変換であるスピンホール効果の系統的な理解と室温における巨大スピンホール効果の発見（Nature Mater. 2008; Phys. Rev. Lett. 2011）
- 熱からスピン流を生成するスピンゼーベック効果の発見（Nature 2008; Nature Mater. 2010）
- 磁性絶縁体中のスピン波スピン流の実証と制御（Nature 2010）
- ファラデーの法則の一般化として予言されたスピン起電力の実証（Nature 2009）
- 純粋スピン流による磁化制御（Nature Phys. 2008）
- 光による磁化制御とスピン流生成（Phys. Rev. Lett. 2008; IEEE Trans. Magn. 2010）
- 力学的角運動量とスピン流との変換に関する理論的基盤の確立（Phys. Rev. Lett. 2011）

などが挙げられる。

また、「スピン流の創出と制御」に有用な材料、およびそのナノヘテロ接合体の探索、創製、プロセス、評価においても、大きな進展があった。主な成果として、

- ハーフメタル・ホイスラー合金の作製・プロセス技術の改善によるトンネル磁気抵抗効果（TMR）および膜面垂直通電型巨大磁気抵抗効果（CPP-GMR）のチャンピオンデータの達成（Appl. Phys. Exp. 2009; Phys. Rev. B 2010）
- ハーフメタル・ホイスラー合金の規則構造評価（HAADF-STEM）および電子状態評価（XMCD）技術の確立（Phys. Rev. B 2010; J. Magn. Magn. Mater. 2010）
- 高効率のスピン偏極電子注入を可能にする磁性金属／半導体接合の作製（Appl. Phys. Exp. 2010; Appl. Phys. Lett. 2010）
- 共鳴トンネルスペクトロスコピーを利用した GaMnAs のフェルミ準位位置の決定（Phys. Rev. Lett. 2010; Nature Phys. 2011）
- 酸化物半導体 Co ドープ TiO_2 における室温強磁性と磁化の電界制御の実現（Appl. Phys. Lett., 2009; Science 2011）

などが挙げられる。

さらに、デバイス応用につながる機能制御の研究においても、以下のような重要な成果が得られた。

- 高品位 CoFeB/MgO/CoFeB トンネル接合の利用による、半導体素子と同程度あるいはそれ以上の検波感度を有するスピントルクダイオードの開発（Appl. Phys. Exp. 2010）
- 強磁性層間の反強磁性結合を利用した、スピントルクによる 20 GHz を超える高周波発振の実現（Appl. Phys. Lett. 2010）
- 強磁性金属を用いた半導体光アイソレータの作製と高性能化、および一方向発振リングレーザーの実現（Appl. Phys. Exp. 2010, 2011）

以上のように、スピン流の創出と制御に関する学理から材料、デバイス応用につながる機能制御まで、多くの顕著な成果が得られており、当初の目的は十分達成されたと考えている。さらに本特定領域の成果である熱とスピン流の問題は、新たに「スピンカロリトロニクス」と呼ばれる分野を形成し、社会的に喫緊の課題であるエネルギー問題とも関係して、今後の大きな発展が期待され、期待以上の成果であると言える。

加えて、本領域の設定以降、関係諸学会で「スピン流」と銘打ったシンポジウムや研究会が数多く開催されるようになった。例えば、応用物理学会（2009 年 9 月）、日本物理学会（2009 年 9 月）、日本磁気学会（2009 年 11 月、2010 年 9 月）、日本金属学会（2010 年 3 月）、MMM-Intermag（2010 年 1 月）などである。この数年の間に「スピン流」の重要性が国内外で広く認知されてきており、本特定領域が果たした役割はきわめて大きいと確信している。

３．　研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況

本特定領域設定時において、A05班の吉田博教授（阪大）が分担者となっていた特別推進研究が採択されたことから、本特定領域の計画研究代表者を辞退することとなった。結果として、吉田博教授はA05班班長の田中雅明教授（東大）グループの研究協力者という形で、本特定領域に参画することになった。十分とは言えないが連携関係を保つことができ、領域全体の運営には支障は生じなかった。

その他には、特に研究推進上大きな問題は起こらなかったが、本特定領域の採択に際して、審査に係る意見として２つの問題点が指摘されていたので、それに対する対応について述べておきたい。２つの問題点とは、第一は「基礎的な研究が主でありデバイス開発などの工学的な展開が明確でない」ということであり、第二は「多くの研究者のエフォート率が低い」ということである。

第一の問題点に対しては、本特定領域では、以下の考え方で研究を推進した。スピントロニクスのデバイス応用で主要なものとしては、磁気ヘッド（センサー）と磁気抵抗型ランダムアクセスメモリ（MRAM）があげられる。磁気ヘッドやMRAMの高性能化については、経済産業省やＪＳＴに既にプロジェクトがあり、本特定領域はそれらと関係はあるものの、けっしてそれらを指向するものではない。本特定領域が目指すものは、既存のデバイスの技術的改良ではなく、スピン流の物理の解明によってもたらされるデバイスのイノベーションである。そのような観点から、本特定領域では次のことに重点を置いた。

① スピントランジスタの基礎となる半導体へのスピン注入
② 研究の芽が出始めていたスピンダイナミクスを利用した応用展開
③ 全く未開拓であったスピン流と熱流との相関を利用した応用展開

前ページの「設定目的の達成度」や後述の「主な研究成果」にも述べてあるように、①では半導体へのスピン注入効率の向上が実現された。②では、半導体素子と同程度あるいはそれ以上の検波感度を有するスピントルクダイオードの開発や20 GHzを超える高周波発振の実現など、今後のデバイス開発につながる成果が得られた。③では、スピンゼーベック効果の発見などの基礎研究の大きな進展で、新しい熱電変換素子の可能性が示唆され、これから応用展開の段階に入るところである。このように、工学的展開につながる成果が十分に得られたと考えている。

第二の問題点に対しては、本特定領域の構成メンバーは、基本的に本特定領域の研究推進には問題ないだけのエフォート率は確保して研究を推進し、他のプロジェクトとの成果の切り分けには十分に配慮してきた。結果として多くの成果が得られたので、問題なかったと考えている。

４． 主な研究成果

（１）研究項目A01：スピン源の探索・創製

A01班では、スピン流の元となる高効率スピン源の材料研究を行った。理論設計、材料とナノ構造の探索と創製、構造解析と電子状態の評価について、計画研究として、６つのグループ（高梨、山本、白井、黒田、高橋、藤森）が連携して研究を遂行した。主な研究成果は以下のとおりである。

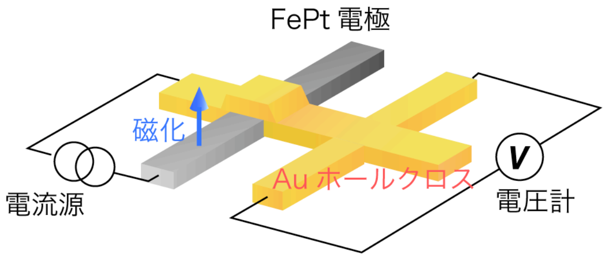

図１ 巨大スピンホール効果を観測した多端子素子構造．（T. Seki *et al*., Nat. Mater., **7** (2008) 125.）

高梨グループは、スピン源として２種類の規則合金に着目した。第一は、高い一軸磁気異方性を有する$L1_0$型規則合金であり、特に、垂直スピン偏極源として、垂直磁化$L1_0$-FePt薄膜を利用する研究を行った。特筆するべき成果として、$L1_0$-FePt薄膜とAu薄膜を組み合わせた多端子素子構造（図１）において、Au薄膜中に垂直偏極スピン流を発生させ、室温で10 %に及ぶ巨大なスピンホール効果を発見し、$L1_0$-FePtが垂直スピン偏極源として有用であることを示した（T. Seki *et al*., Nature Mater., 2008)。さらに、Auの巨大スピンホール効果は、そのメカニズムに関して理論研究者の間に白熱した議論を呼び起こし、永長（A03班）、前川（A04班）らは高梨グループと連携して、共鳴スキュー散乱の理論を展開した（G. Y. Guo *et al*., Phys. Rev. Lett., 2009; B. Gu *et al*., Phys. Rev. Lett., 2010)。第二は、伝導電子のスピン偏極率が100 %と言われているハーフメタル・ホイスラー合金を高効率スピン源として利用した研究である。特に、Co_2MnSiとAgを組み合わせた膜面垂直通電型（CPP）素子において、室温で30~40 %の大きなCPP-GMRを観測し（T. Iwase *et al*., Appl. Phys. Exp., 2009; Y. Sakuraba *et al*., Phys. Rev. B, 2010)、磁気ヘッド等へのデバイス応用の可能性を示した。図２に、良好なエピタキシャル構造を示す試料の断面TEM像と実際の磁気抵抗効果（MR）曲線を示す。

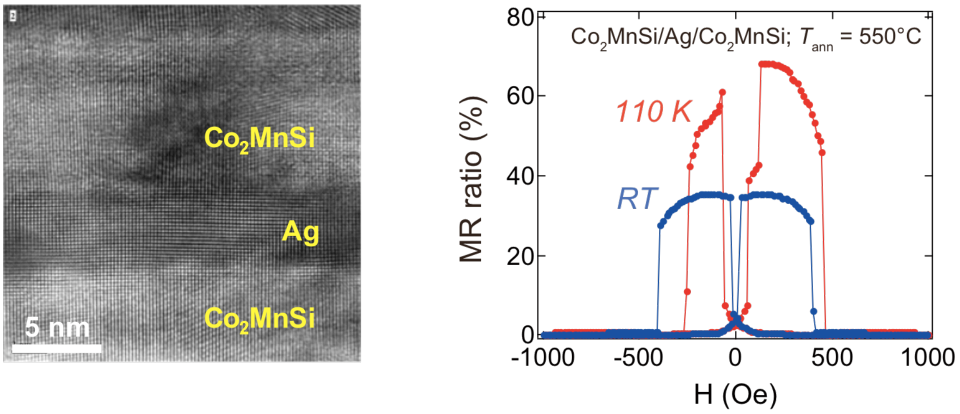

図２ 大きなCPP-GMRを観測した$Co_2MnSi/Ag/Co_2MnSi$試料の断面TEM像（左）と磁気抵抗効果（MR）曲線（右）．（Y. Sakuraba *et al*., Phys. Rev. B **82** (2010) 094444. ）

同グループは、ナノ構造化によるスピン流の創出に関する研究にも取り組んだ。具体的には金属ナノ粒子を２つの電極で挟んだ単一電子トンネル素子を作製し、トンネル磁気抵抗効果（TMR）の挙動を精密に解析することによって、ナノ粒子中のスピン蓄積やスピン緩和に関する情報を得た。実際に、CrやAuナノ粒子中で、サイズ効果による電子準位の離散化により、スピン緩和時間が大幅に増大することが明らかになった。

山本グループは、高効率スピン源としてハーフメタル・ホイスラー合金を利用して、TMRの研究を集中的に行った。ホイスラー合金を用いたTMRは、その大きな温度特性が実用上の

障碍であったが、同グループはCo_2MnSi/Al-O/Co_2MnSiおよびCo_2MnSi/MgO/Co_2MnSiという２つのトンネル接合系について、d*I*/d*V*曲線から伝導機構のスピンフリップ過程を詳細に解析することによって界面状態の役割を明らかにし、温度特性改善の指針を得た（T. Ishikawa *et al*., J. Appl. Phys., 2009）。さらに、組成や格子不整合を適切に制御することによってTMRが増大することを示し（T. Ishikawa *et al*., Appl. Phys. Lett., 2009）、最高値として低温で1995 %、室温で450 %という大きなTMRの実現に成功した（unpublished）。これらの値は、ホイスラー合金を用いたTMRとしては、チャンピオンデータである。

白井グループは、理論計算という立場から、スピン源となる材料の設計や、実験グループの実験結果の解析を行った。実験グループとの共同研究の成果として、高梨グループで得られたCo_2MnSi/Ag/ Co_2MnSiにおける大きなCPP-GMRについて、第一原理伝導計算を行い、界面における電子散乱の大きなスピン非対称性が原因であることを明らかにした（Y. Sakuraba *et al*., Phys. Rev. B, 2010）。また、山本グループで作製されたCo_2MnSi/MgO試料のX線吸収磁気円二色性（XMCD）スペクトルの結果が、界面がMnSi終端面の場合に対応していることを、第一原理電子状態計算から明らかにした（T. Saito *et al*., Phys. Rev. B, 2010）。

黒田グループは、スピン源となる材料として、磁性化合物半導体に着目した。特に、CrTe, (Zn, Cr)Te, (Cd, Mn, Cr)Teなどの成長条件や構造、磁気特性について、藤森グループや高橋グループなどの評価グループと連携して包括的・系統的な研究を行い、強磁性発現機構について重要な知見を得た（Y. Yamazaki *et al*., J. Phys. C, 2011）。

藤森グループは、光電子分光やXMCD技術を用いて、山本グループや黒田グループなどの材料創製グループが作製する試料の電子状態評価を行った。主な成果として、山本グループが作製したCo_2MnSi/MgO試料のXMCDスペクトルを測定し、白井グループによる理論計算と比較して、界面がMnSi終端面であると同定したこと（前述、T. Saito *et al*., Phys. Rev. B, 2010）、黒田グループが作製した(Cd, Mn, Cr)Te試料のXMCD測定から、CrとMnの磁気モーメントが強磁性結合していることを明らかにしたこと（unpublished）などが、あげられる。

高橋グループは、透過電子顕微鏡やアトムプローブ技術を用いて、山本グループや黒田グループなどの材料創製グループが作製する試料の微視的構造評価を行った。主な成果として、山本グループが作製したCo_2MnSi/MgO試料のSTEM-HAADFにより構造解析を行い、世界で初めて原子レベルで$L2_1$規則構造を直接観察することに成功した（図３；M. Nakatani *et al*., J. Magn. Magn. Mater., 2010）。

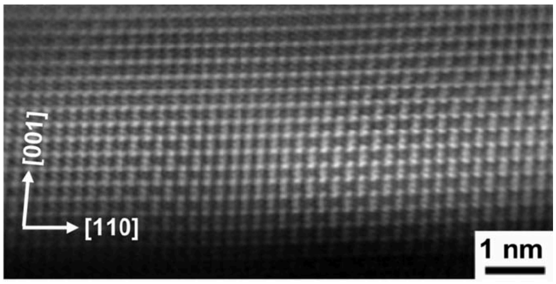

図３　$L2_1$規則構造を示すCo_2MnSi/MgOのSTEM-HAADF像. (M. Nakatani *et al*., J. Magn. Magn. Mater., **322** (2010) 357.)

公募研究としては、６つのグループ（角田、柳原、松下、壬生、川越、林）が参加し、計画研究ではカバーされていない材料の創製や評価を行った。角田グループは、スピン源としてγ'-Fe_4Nに着目した。Fe_4N/MgO/CoFeBトンネル接合を作製し、Fe_4Nの負のスピン偏極を反映したインバースTMRやインバーススピン注入磁化反転を観測した（S. Isogami *et al*., Appl. Phys. Exp., 2010）。柳原グループは、高効率スピン流創出のためにスピンフィルター効果に着目し、その材料としてスピネル型強磁性酸化物$Fe_{3-\delta}O_4$薄膜の成長や構造、微視的磁性に関する基礎研究を行った。松下グループは、スピン源の材料として有機局在スピン−伝導電子共存系に着目し、BTBN中性結晶において巨大磁気抵抗効果を観測し（H. Komatsu *et al*., Polyhedron, 2009）、有機スピントロニクスの展開にとって重要な結果を得た。壬生グループは、高梨グループなどの材料を創製するグループと連携し、試料のメスバウア効果を行い、局所的な磁性を評価した。川越グループは、走査トンネル顕微鏡（STM）技術を駆使して、磁性薄膜表面のスピン偏極像やバリアハイト像を観測し、スピン源となる材料の表面に関する基礎研究を行った。林グループは、スピン起電力の観測に有効な磁性ナノ構造を提案し、実証した。

（２）研究項目A02：スピン流とナノヘテロ構造

A02班では、金属、半導体、酸化物等で構成されるナノヘテロ構造を用いて電流からスピン流を効率良く生成し、伝播させ、更に電流に再変換する新たな操作原理を探索し、その手法を確立することを主目的とした。最終的には上述の研究を基にスピン流回路の要素技術の確立を目指して４つの計画研究グループ（大谷、新田、井上、秋永）が研究を遂行した。主な研究成果は以下のとおりである。

大谷グループは、特定領域設定以前に5d遷移金属Ptのスピンホール効果の電気的測定に成功した実績に基づいて、4dおよび5d遷移金属のスピンホール効果の系統的な実験を行った。その結果、スピンホール効果の大きさが遷移金属単体のLS結合の大きさに比例しており、内因性発現機構がスピンホール効果に大きな役割を果たしていることを、井上グループと共同で実験と理論の両面から検証した（M. Morota *et al.* Phys. Rev. B, 2011)。さらに、外因性の散乱（特にスキュー散乱）についても、その大きさが4d, 5d遷移金属不純物のLS結合の大きさに比例していることに着目して実験を進め、CuにIr不純物を添加することにより2.1％の大きなスピンホール角を得ることに成功した（図４；Y. Niimi *et al.*, Phys. Rev. Lett., 2011)。この他、純粋スピン流による磁化反転（T. Yang *et al.*, Nature Phys., 2008）やスピン注入接合にMgO界面層を挿入することにより銀ナノ細線中のスピン蓄積を従来の100倍に増強し、10 μmに及ぶスピン拡散伝導の検出に成功した（図５；Y. Fukuma *et al.*, Nat. Mater., 2011)。

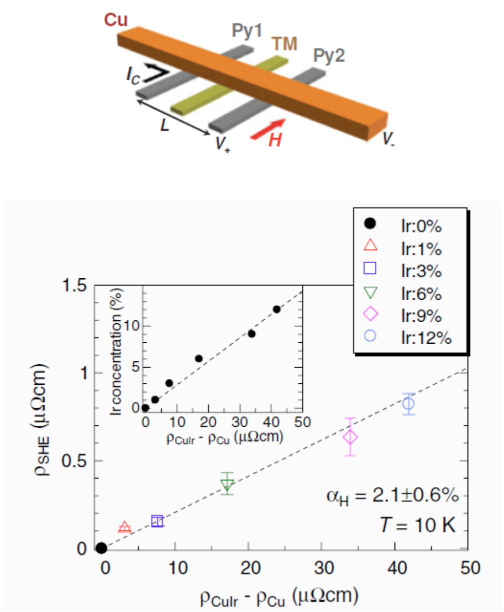

図４　実験に用いた素子構造（上）とスピンホール抵抗のIr不純物による抵抗変化依存性（下）．良好な線形性を保って増大していることが分かる．（Y. Niimi *et al.*, Phys. Rev. Lett., **106** (2011) 126601.）

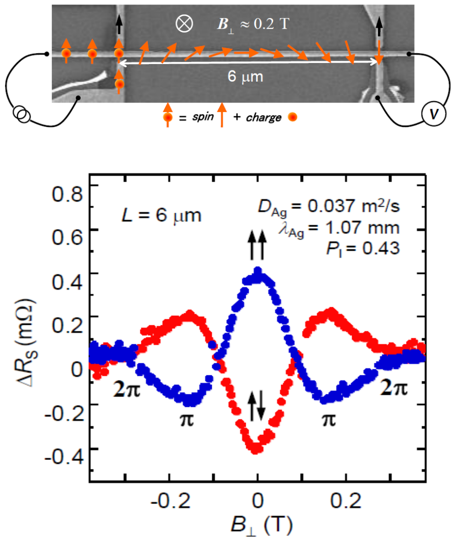

図５　長距離スピン拡散伝導測定に用いた面内Py/MgO/Ag接合スピンバルブ素子構造（上）とスピン蓄積信号の磁場依存性（下）．（Y. Fukuma *et al.*, Nat. Mater., (2011) in press.）

新田グループは、Rashbaスピン軌道相互作用を電場で制御することによりスピン操作を行う手法の研究を集中的に行ってきた。この手法の弱点であるスピン緩和が散乱方向に依存して短くなる問題点を、スピン緩和長より細い細線構造にすることにより、克服できることを実験的に検証した（図６；Y. Kunihashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. 2009)。また、III-V族半導体中においてヘテロ構造の非対称性に起因したRashbaスピン軌道相互作用とバルクの構造反転対称性の破れに起因するDresselhausスピン軌道相互作用の比を求める手法を確立した（M. Scheid *et al.*, Phys. Rev. Lett., 2008)。さらに、ゲート電極付きInGaAs細線構造を用いることによりRashbaとDresselhausの両機構の寄与が等しくなるときに予想される永久スピンヘリックス状態を、ゲート電圧を変化させることにより定在化することに成功した。

井上グループは、遷移金属におけるスピンホール効果について、現実的電子構造と原子内スピン軌道相互作用（LS結合）を取り入れた系統的な理

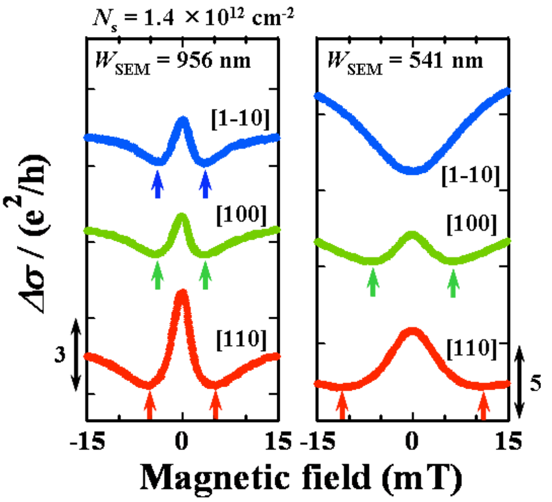

図６　[110], [100], [1-10] 方向に作製したInGaAs細線構造の磁気コンダクタンス．*W*= 956 nmではスピン緩和の異方性は大きくないが，*W*= 541 nm と細くすると大きな異方性が観測される．（Y. Kunihashi *et al.* Phys. Rev. Lett., **102** (2009) 226601.）

論解析を行なった（T. Tanaka *et al.*, Phys. Rev. B, 2008）。その結果，遷移金属は，半導体と比較して桁違いに大きなスピンホール伝導度を示すことを明らかにした。これらの結果は，大谷グループの実験結果をよく説明することが分かった。また，遷移金属におけるスピンホール効果や異常ホール効果には，軌道のダイナミクスに由来する軌道ホール効果が本質的役割を果たすことを明らかにした（H. Kontani *et al.*, Phys. Rev. Lett., 2009）。２次元系であるグラフェンに対しても同様な解析をおこない、フェルミ準位でのスピンホール伝導度は小さいものの、グラフェン層の非平坦性を取り入れると、Rashba的スピン軌道相互作用が生じ、スピンホール伝導度が増強されることを明らかにした（S. Onari *et al.*, Phys. Rev. B, 2008）。また、強磁性微粒子を含むPtまたはAu薄膜において、異常ホール抵抗と電気抵抗との間に異常な関係を、非磁性金属のスピンホール伝導度と電気抵抗の関係に対し最近見いだされたクロスオーバーの結果を用いることにより､説明することができた(J. Inoue *et al.*, Phys. Rev. B, 2009)。さらに、強磁性金属と半導体接合によるスピンFET実現を目指して、ショットキー障壁を有する強磁性体/GaAs接合におけるスピン注入と、強磁性金属/グラフェン/強磁性金属接合におけるトンネル磁気抵抗効果（TMR）の数値シミュレーションも行なった。前者に関しては，GaAs側ショットキー障壁内に形成される界面共鳴状態が強磁性Feの電子状態と混成することによりスピン分極し，ショットキー障壁を通過する電流のスピン依存性が増強されることを明らかにし、強磁性体/半導体接合作製に対して大きな指針を与えた。後者については，大きな磁気抵抗効果の発現機構として接合界面における電子状態の変化が重要であることを明らかにした。

秋永グループは、スピントロニクスとシリコンテクノロジーとの融合を推進するため、シリコンベース強磁性体の開発、および強磁性体金属／シリコンヘテロ構造におけるスピン偏極電子注入を目指した研究を行い、前者に関しては、イオン注入法を用いて強磁性Mn_5Si_2:Cの作製（G. H. Lee *et al.,* Physics Procedia, 2011）、後者については$CaF_2/Fe_3Si/CaF_2$共鳴トンネルダイオード(RTD)の作製（K. S. Makabe *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 2010）に成功した。

公募研究としては、２つのグループ（斎藤、加藤）が参加した。斎藤グループは、スピン注入の高効率化を目指し、金属/絶縁体/半導体（MIS）型構造を有する$Fe/GaO_x/Ga_{1-x}Mn_xAs$ トンネル接合素子を作製し、MIS型トンネル接合素子では、従来の最高値である58%のTMRを達成した（H. Saito *et al.,* Appl. Phys. Lett., 2008）。また、Fe/GaO_x/n-AlGaAs MIS型トンネル接合素子において、素子抵抗の対数がGaO_x膜厚に比例すること、GaO_xの有効バリア高さが極めて低い（室温で0.10 eV）ことを明らかにした（J. C. Le Breton *et al.,* Appl. Phys. Lett., 2009）。さらに、量子井戸発光素子のエレクトロルミネッセンス（EL）測定を行い、GaO_x はMgOよりもGaAsへの高効率の電子注入が可能であることを示し、トンネル伝導測定から40%のスピン偏極率を得た（H. Saito *et al.,* Appl. Phys. Lett., 2010）。加藤グループは、カーボンナノチューブ内の電流誘起スピンを検出するための構造である、カーボンナノチューブ・窒化物半導体ハイブリッド電界効果トランジスタの試作に取り組んだ。素子作製を成功させるために最も重要である単一カーボンナノチューブをGaN薄膜上に合成する手法の確立に集中し、触媒

パターニングに成功した。さらに、フォトルミネッセンスを利用した電流誘起スピンの検出のため、単層カーボンナノチューブの顕微分光も試み、ルミネッセンス検出に成功した（S. Moritsubo *et al.,* Phys. Rev. Lett., 2010）。

（３）研究項目A03：スピン流と光物性

A03班では、光によるスピン制御・検出技術の開発を目指して、スピン流と光との相関によって生じる諸物性の研究を、４つの計画研究グループ（大野、宗片、安藤、永長）によって行った。主な研究成果は以下のとおりである。

大野グループは、半導体量子構造における光⇔スピン流変換を基礎とし、半導体デバイスの基本原理（電界制御，発光・受光）を駆使して核スピンの量子位相の制御・検出を光学的手法により実証することを目的とし、光による核スピン制御・検出が可能となる半導体量子ナノ構造デバイスの作製と、核スピンの量子コヒーレンス制御、およびスピン流を介した光と核スピン間の相互作用の制御を行い、量子スピントロニクスデバイス基盤技術の確立を進めた。具体的には、n型(110)GaAs/AlGaAs単一量子井戸をチャネル層とする電界効果トランジスタ構造において、核スピンのエネルギー緩和時間と位相緩和時間の電子密度依存性を時間分解カー回転測定による光検出NMR測定より調べ、前者は１０倍以上，後者も２倍近く電子密度変調により制御可能であることを実証した（M. Ono *et al.*, Appl. Phys. Lett., 2010）。また、GaAs/AlGaAs量子井戸構造中の核スピンコヒーレンスの光検出を実証した。円偏光短パルス光により電子スピンを励起し、超微細相互作用を介して核スピンを分極すると同時に、核磁場の変化によって生じる電子スピン歳差運動の位相変化を時間分解ファラデー回転測定法で検出することにより核磁気共鳴（NMR）スペクトルを得た。スピン3/2の^{75}Asを対象に量子ゲート操作に用いられる多重NMRパルス列を印加し、NMRスペクトルの光検出を行って多準位核スピン系の位相制御を検証した（図７；Y. Kondo *et al.*, Phys. Rev. Lett., 2008）。

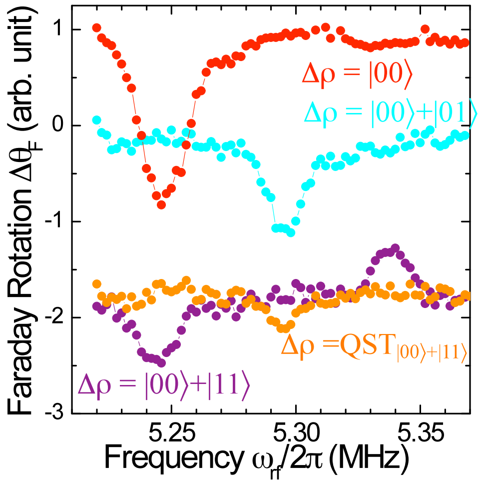

図７　擬純粋状態|00⟩、重ね合わせ状態|00⟩+|01⟩、Bell状態|00⟩+|11⟩、およびQST結果のNMRスペクトル．（Y. Kondo *et al.*, Phys. Rev. Lett., **101** (2008) 207601.）

さらに、同グループは、高空間分解能時間分解顕微分光システムを利用して、スピンホール効果の定量的測定にも成功した。スピンホール効果と光注入によって生成されるそれぞれのスピン蓄積量を比較・解析することによってスピンホール導電率σ^{SH}を実験的に決定し、n型GaAsにおける外因性スピンホール効果の電子濃度n依存性について調べた結果、σ^{SH}はnに対して増加し、電界(5~20 mV/mm)に対して一定であることを明らかにした。また、理論モデルと比較してσ^{SH}の計算結果が実験結果を定量的によく説明できることを示した（S. Matsuzaka *et al.*, Phys. Rev. B, 2009）。

宗片グループは、強磁性半導体における光による磁化制御に取り組み、バンド間光励起により(Ga,Mn)Asの磁化が才差運動を開始すること、その周波数や減衰がMn組成に依存して系統的に変化することを見出した。時間分解磁気ヒステリシスおよびジャイロ磁気モデルに基づくシミュレーションに基づき、この現像が光励起による熱的効果でなく、キャリアの非平衡状態がスピン・軌道相互作用を経由して強磁性Mnスピン系にトルクを与える非熱的効果による発現機構によると提唱した。現在、この説をめぐる研究が国内外で活発化している。これらを総括して、強磁性半導体を光励起するとスピン流が発生するとの仮説を提唱した。

次に、同グループは光誘起スピン流の実証と制御をめざし、隣接金属層が磁化の光誘起才

差運動に与える動的影響を調べた（図８＆図９；S. Kobayashi *et al.*, IEEE Trans. Magn., 2010）。具体的にはPt/(Ga,Mn)AsならびにFe/(Ga,Mn)As構造を取り上げた。前者において才差運動減衰の増大がスピンポンピング効果でよく説明できることから、両層間で角運動量の流れ（スピン流）があることを確立した。後者においては、才差運動の減衰が外部磁場に依存して大きく変化する現象を世界に先駆けて見出した。具体的には、両層の磁化が平行だと減衰は最小で、直交だと最大になるという現象である。すなわち、直交状態で生ずる界面磁壁でスピン流の消費が最大になる。これを、巨大磁気ダンピングと名づけた。

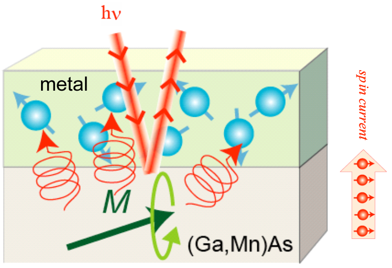

図８ ：光誘起スピン流と試料構造.
（H. Munekata *et al.*, presented at APS March Meeting, March 22, 2011, Dallas）

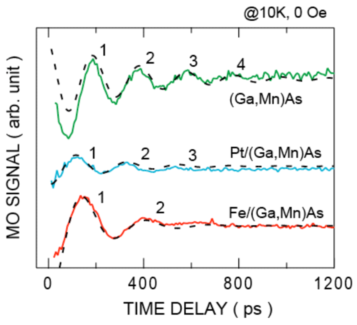

図９　試料構造で異なる才差運動減衰の様子.
（modified from S. Kobayashi, *et al.*, IEEE Trans. Magn., **46** (2010) 2470.）

安藤グループは、ポンププローブ法（S. Mizukami *et al.*, Appl. Phys. Exp., 2008）を用いて、ハーフメタル・ホイスラー合金を含むさまざまな強磁性金属薄膜のスピンダイナミックスの研究を行った。具体的には、パルスレーザー光を照射した際にサブピコ秒領域で発生する減磁現象について詳細に調べた。Mn-Ga合金ならびにCo系垂直磁化膜の超高速減磁時間τは励起レーザー強度Pに対し増大する傾向を示し、微視的な理論と傾向が一致した。他方、AgやCr下地上に積層したCo_2MnSiホイスラー合金のτはPに対し減少する傾向を示した（図１０＆図１１；S. Mizukami *et al.*, Appl. Phys. Lett., 2010）。これらの結果は、Co_2MnSiの高いスピン分極率との相関を示唆する結果であり、今後スピンダイナミックスに関してハーフメタル性を考慮した微視的な理論を確立する必要性があることを示している。また、強磁性共鳴法を用いて、スピン拡散長の研究も行った。具体的には、強磁性体F1から強磁性共鳴によってスピン流を生成し、Cu膜内を伝搬した後にもう一方の強磁性体F2内で緩和する過程を調べることにより、強磁性体F2の横スピン侵入長を測定した。Co，CoFe，FeNiにおけるスピン侵入長は1.7 nm，2.5 nm，3.7 nmであることがわかった（T. Taniguchi *et al.*, Appl. Phys. Exp., 2008）。また、F1としてMgO単結晶基板を用いた$Ni_{80}Fe_{20}$エピタキシャル合金とした、$Ni_{80}Fe_{20}/Cu/Co_{40}Fe_{40}B_{20}$多層膜の構成において、$Co_{40}Fe_{40}B_{20}$の横スピン侵入長が12 nm程度と見

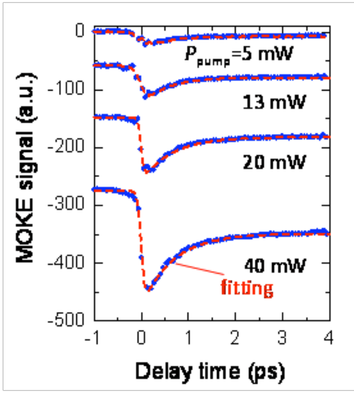

図１０　Co_2MnSi薄膜の高速減磁曲線.（S.Mizukami *et al.*, J. Phys. Conf. Ser., 200 (2010) 042017.）

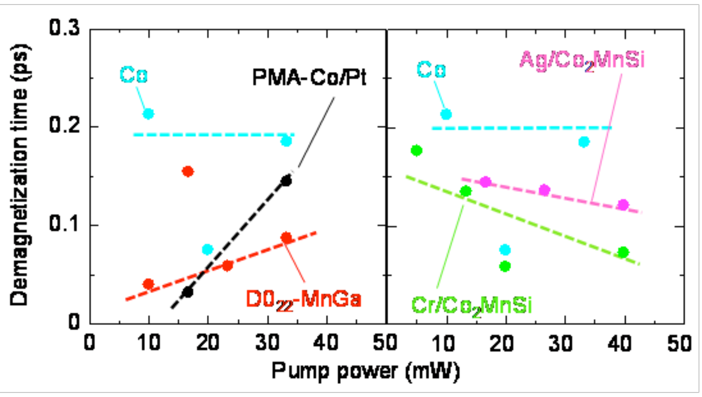

図１１　各種薄膜の高速減磁時間τの励起レーザー強度依存性。（S. Mizukami *et al.*, Appl. Phys. Lett., 96, 2010，他.）

積もられ、多結晶で同じ構成の積層膜のそれ（3.2 nm）と比較して増大した。すなわち、非磁性(N)/強磁性(F2)界面状態が侵入長に影響を及ぼすという、興味深い結果が得られた。

永長グループは、光とスピン流に関わる根本的な問題に関して、理論の立場から研究した。スピン流の定義は古くからさまざまな議論がなされてきたが、その根幹には保存則がスピン軌道相互作用により破れてしまうという問題が横たわっていた。永長グループはこの基本的問題に立ち戻って、保存則を満たす一般化したスピン密度、スピン流密度を理論的に構築できるかを検討した。その結果、非可換量子場の理論で発展してきた手法を応用することで、実際に保存量を作ることに成功した。乱れたRashba系の数値シミュレーションを行い、確かに一般化した全スピンが保存していることを確かめた。さらに進んで、この保存則から導かれる新しい現象「スピン軌道エコー」の理論的提案を行った。これは、スピン軌道相互作用の強さを断熱的にゼロへと変化させると、一度緩和したスピンが復活するというもので、この過程も数値シミュレーションによって実証することができた。

さらに、永長グループは前川グループ（A04班）との共同研究で、近藤効果がスピンホール効果を増強する可能性について検討した。Auの中のFe不純物の示す軌道依存近藤効果を、第一原理状態計算と量子モンテカルロ計算を用いて調べ、スピン揺らぎがスピン軌道相互作用の効果を増強し、大きなスピンホール角をもたらすことを示した（B. Gu *et al.*, Phys. Rev. Lett., 2010）。加えて、Pt不純物が表面近傍に存在したときにも、同様の機構が働くことを明らかにした（B. Gu *et al.*, Phys. Rev. Lett., 2010）。これらの結果は、高梨グループ（A01班）の実験結果をよく説明することがわかった。

公募研究としては、今田グループが参加し、X線吸収磁気円二色性（XMCD）−光電子顕微鏡（PEEM）技術を用いて、非磁性体中のスピン流の観測を試みた。

（４）研究項目A04：スピン流と電子物性

A04班では、スピン流と電子との相関によって生じる諸物性の研究を行った。特にスピン流と電子の運動（電流）や磁気モーメントとの相関について明らかにすることを目的として、５つの計画研究グループ（小野、齊藤、勝本、前川、多々良）が研究を推進した。主な研究成果は以下のとおりである。

小野グループは、微細加工を用いて作製した磁壁や磁気渦などのモデル系におけるスピン流励起ナノスピンダイナミクスを研究することで、スピン流による磁気構造のナノスケール制御を確立すること、さらに逆効果と考えられるナノスピン構造励起によるスピン流創出を目指して研究を行った。磁気円二色性を利用したX線顕微鏡を用いることで、電流誘起磁気コア共鳴運動の様子を実時間実空間観察することに成功し、電流のスピン偏極率を求めることに成功した（S. Kasai *et al.*, Phys. Rev. Lett., 2008）。ナノ秒の電流パルスを印加するだけで磁気円盤中の磁気コアの向きを反転することが可能であることを示した（K. Yamada *et al.*, Appl. Phys. Lett., 2008）。短時間で完全に磁気コアの向きを制御することが可能であり、磁気コアメモリーの書き込み手法の確立に相当する。さらに、磁気円盤の磁化の回転運動をトンネル磁気抵抗素子によって検出することで動作する３端子素子を作製し（S. Kasai *et al.*, Appl. Phys. Exp., 2008）、磁気コアメモリーとしても動作することを示し、出力振幅の大きさで磁気コアの向き（ビット情報）を読み出すことが可能であることを見出した（K. Nakano *et al.*, Appl. Phys. Exp., 2010）。

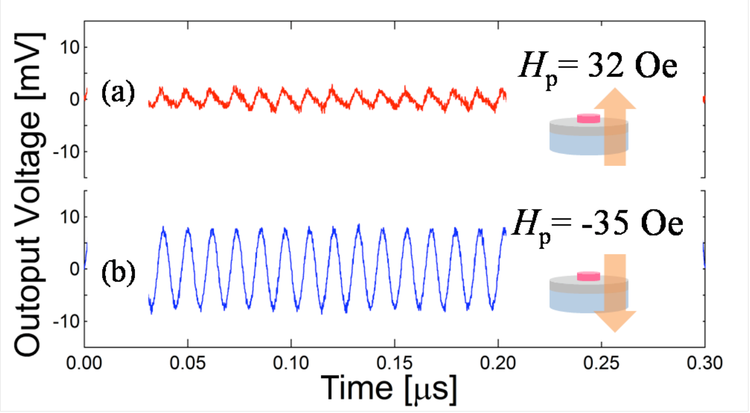

図１２　磁気コアメモリーからの情報読み出し結果.
(K. Nakano *et al.*, Appl. Phys. Exp. **3** (2010) 053001.)

齊藤グループは、磁性薄膜系におけるスピン流と電流、電磁場、熱流との相互作用を実験的に調べた。磁性薄膜中にスピンホール効果でスピン流を注入することによる磁化ダイナミクス変調効果を観測し、スピントルク・スピンポンプ・スピンホール効果がもたらす磁性薄膜の一様磁化ダイナミクスとスピン流注入（放出）の相互作用を実験的に体系化した（K. Ando *et al.*, Phys. Rev. B, 2008）。さらに上記薄膜に熱流を印加することによってスピン圧が生成される現象「スピンゼーベック効果」を発見した（K. Uchida *et al.*, Nature, 2008）。スピンゼーベク効果は、磁性モット絶縁体（磁性ガーネット結晶）でも発現することを見出し（K. Uchida *et al.*, Nature Mater., 2010）、逆スピンホール効果と組み合わせることで、世界で初めて絶縁体における熱電変換を実現した。温度依存性・物質依存性の測定により、これらの系でのスピンゼーベック効果は、スピン波およびフォノンの伝播によってもたらされる熱的スピンポンプ効果と理解できることを示した。同時に、スピン波スピン流を利用して、絶縁体中でも電気信号を伝送できることを実証した（図１３；Y. Kajiwara *et al.*, Nature, 2010）。

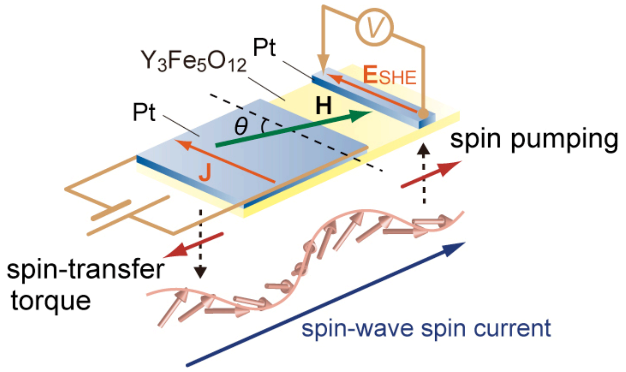

図１３　絶縁体中を伝搬するスピン波スピン流の概念図.（Y. Kajiwara et al., Nature, **464** (2010) 262.）

勝本グループは、量子ドットで生じる単電子効果を用い、半導体ナノ構造中でスピンを用いた論理操作、量子情報操作を可能にする技術を追求した。強磁性半導体(Ga,Mn)As 素子において、薄膜に垂直・水平いずれの方向の電流注入でも磁化方向の制御が可能であることを示した。さらに、２重量子井戸構造において、電流注入によって整流特性を反転させる新しい機能を見出した（図１４；Y. Hashimoto *et al.*, Appl. Phys. Exp., 2011）。量子ドットを用いたスピン流生成法として、ゲート電圧によって閉じ込めにポテンシャルを変化させることで電子数を固定したまま多体効果により高スピン状態へ遷移させ、これをポンプアウトするものを提案し実証した（T. Otsuka *et al.*, Physica E, 2008）。スピン軌道相互作用の強い２次元電子系を作製して量子ポイントコンタクト（QPC）構造とし、このQPCを直列化して量子ドットを形成することで、スピン偏極（スピン流生成）を確認した。

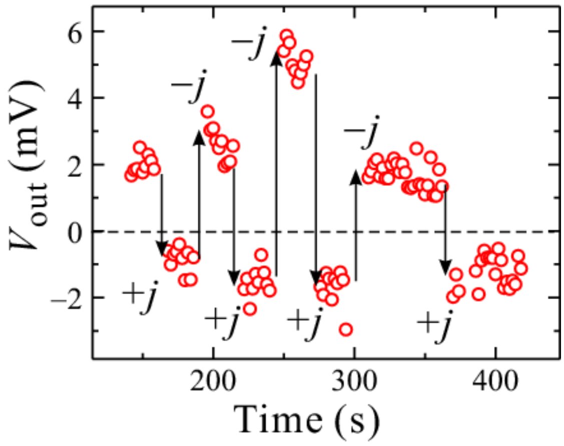

図１４ (Ga,Mn)Asトンネル接合整流特性の電流注入による反転.（Y. Hashimoto *et al.*, Appl. Phys. Exp. **4** (2011) 063004.）

前川グループは、電気・磁気・熱の３種類のエネルギーの相互変換および力学的回転による角運動量と磁性体の磁化の結合について理論的に研究した。強磁性金属ではスピンベリー位相の時間変化がスピンに対する起電力（スピン起電力）を発生させることを見出し（S.E. Barnes and S. Maekawa, Phys. Rev. Lett., 2007; Y. Yamane *et al.*, J. Appl. Phys., 2011）、小野グループや田中グループ（A05班）によって実験的にも確かめられた。このスピン起電力は磁性体において磁気エネルギーと電気エネルギーの相互変換に対応する。さらに、齊藤グループによって発見されたスピンゼーベック効果の理論構築も行った（H. Adachi *et al.*, Appl. Phys. Lett., 2010; H. Adachi *et al.*, Phys. Rev. B, 2011; J. Ohe *et al.*, Phys. Rev. B, 2011）。以上の研究は、電気・

磁気・熱の３種類のエネルギーを相互に変換できることを示したものである。さらに、回転系の量子力学の建設を目指し、力学的回転が電子に磁場及びスピン軌道相互作用と等価な作用を与えることを見出した（M. Matsuo *et al.*, Phys. Rev. Lett., 2011）。これにより、力学的な角運動量とスピン角運動量を対等に取り扱うことが可能になった。

多々良グループは、スピンホール効果と逆スピンホール効果の微視的理論と応用に関する理論的研究を行った。スピン蓄積を用いたスピン注入、磁化ダイナミクスを用いたスピンポンピング効果、温度勾配を用いたスピン流生成（スピンゼーベック効果）の現象に関して、微視的な解析を進め、スピン化学ポテンシャルの微視的な表式を得るなど、現象の理論的理解を進めた（Y. Takezoe *et al.*, Phys. Rev. B, 2010）。結果として、スピンポンピング効果は、磁化ダイナミクスがある一定の普遍性に基づきスピン流を生成するという現象ではなく、スピン軌道相互作用の詳細に依存する現象であることも明らかになった（K. Hosono *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn., 2010; A. Takeuchi *et al.*, Phys. Rev. B, 2010）。スピン流の測定に関しては、電気的な検出を用いる逆スピンホール効果の解析を行い、逆スピンホール効果はスピン流を電流に変換しているという従来の描像は、近似的・現象論的なもので、物理的には正当性がないものであることがわかった。これらの研究成果を統合し、スピンポンピングと逆スピンホール効果を組み合わせた現象は、磁化の運動がモノポールを生成し、そのモノポールがアンペール則により電流を発生しているという描像を提案した（A. Takeuchi and G. Tatara, cond-mat arViv, 2011）。

公募研究としては土井グループが参加し、ナノ狭窄構造薄膜におけるマイクロ波発振に関する研究を行った。自己組織化法を用いて絶縁体層中に電流狭窄ナノチャネルを作製する方法を開発し、ナノチャネルに磁壁を閉じこめ、スピントランスファートルクによるマイクロ波発振の条件を系統的に調べた。その結果、ナノチャネル間のコヒーレンシーを示唆する高い発振出力を得た。

（５）研究項目 A05：スピン流と機能・制御

A05班では､デバイス応用につながるスピン流の制御や機能性を明らかにすることを目的として、４つの計画研究グループ（田中、鈴木、清水、仲谷）が研究を行った。主な成果は以下のとおりである。

田中グループは、強磁性半導体および強磁性微粒子を用いたナノ構造とデバイス、IV族ベース半導体スピンデバイスの研究を行った。具体的には、まず強磁性半導体GaMnAsの超薄膜を量子井戸として２重障壁共鳴トンネルダイオード構造を作製し、共鳴トンネルによりTMRを増大させるとともに、共鳴トンネルスペクトロスコピーというユニークな手法を用いてGaMnAsの価電子帯構造とフェルミ準位の位置を明らかにした（図１５）。特にGaMnAsのフェルミ準位の位置が禁制帯中にあることが明瞭に示されたことは、III-V族強磁性半導体における強磁性発現機構を理解する上で極めて重要である。得られた結果は、今まで10年以上にわたって一般的に受け入れられてきたこ

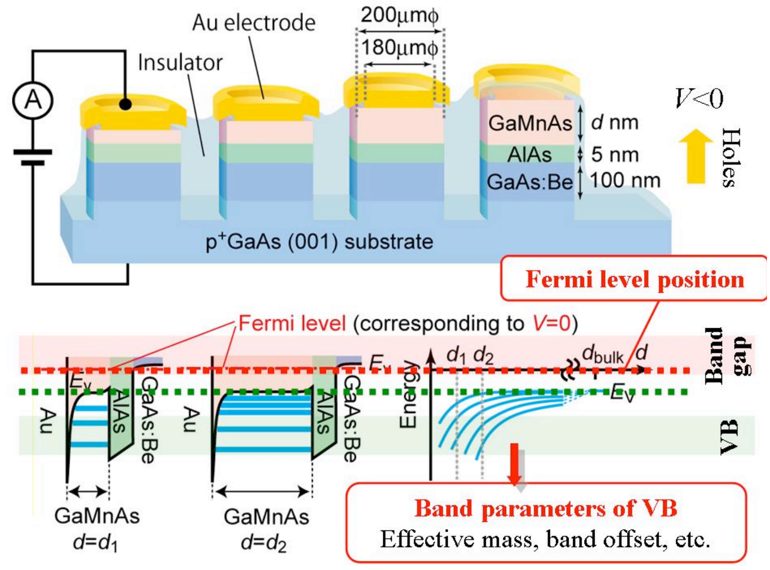

図１５　表面量子化を用いた共鳴トンネル分光法により、さまざまな強磁性半導体GaMnAs試料において、フェルミ準位の位置とバンド構造を系統的に明らかにした.（S. Ohya *et al.*, Nature Phys., **7**, (2011) 342.）

れらの系のバンド構造の理解とは異なっており、今後これらの材料系の研究を進める上で、また、これらの材料系を用いた次世代スピントロニクス素子を実現する上で、重要な指針になると期待される（S. Ohya *et al.*, Phys. Rev. Lett., 2010; Nature Phys., 2011）。

同グループは、強磁性体MnAsのナノスケール微粒子を含む磁気トンネル接合において、前川グループ（A04班）によって予言された「スピン起電力」効果も観測した。さらに、この「スピン起電力」により、100,000%を超えるきわめて大きな磁気抵抗効果を実現した。これにより、磁気エネルギーから電気エネルギーへの効率的な変換が可能になり、新しいタイプの電池（スピン電池）や超高感度磁気センサーとしての応用が期待される（図１６；P. N. Hai *et al.*, Nature 2009）。また、GaAs半導体マトリックス中に分散する六方晶の結晶構造をもつ強磁性金属MnAsナノ微粒子（直径〜5 nm）を含む単電子スピントランジスタ構造を作製し、微粒子における極めて長いスピン緩和時間（10μs）　を観測した。この値はこれまで報告された金属ナノ微粒子のスピン緩和時間として最も長く、最近報告されたCo微粒子のスピン緩和時間より2桁（約100倍）、バルク金属と比べると7桁（約10,000,000倍）も長い値である。この成果は、強磁性微粒子の超高密度スピンメモリや再構成可能なスピントランジスタ等、次世代のスピントロニクスデバイスへの応用につながると期待される（図１７；P. N. Hai *et al.*, Nature Nanotech. 2010）。さらに、MnAsを強磁性電極とするspin MOSFETデバイスを作製し、スピンバルブ効果を観測するなど、スピンMOSFET作製に向けて進展があった（R. Nakane *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 2010）。加えて、強磁性トンネル接合とMOSFETを組み合わせた疑似spin MOSFETも作製し、室温で45%という大きな磁気電流比を得た（Y. Shuto *et al.*, Appl. Phys. Exp., 2010）。

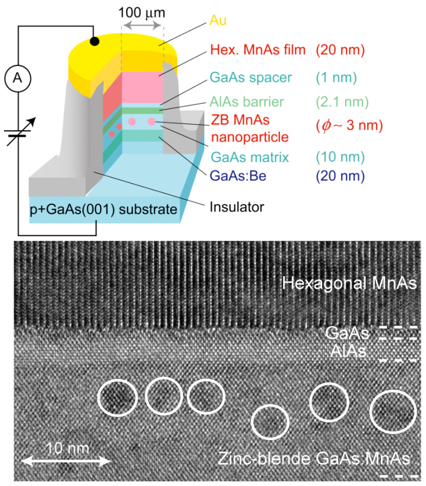

図１６　スピン起電力の観測に用いられた閃亜鉛鉱型MnAs微粒子を含む強磁性トンネル接合とその断面TEM像.
（P. N. Hai *et al.*, Nature, **458** (2009) 489.）

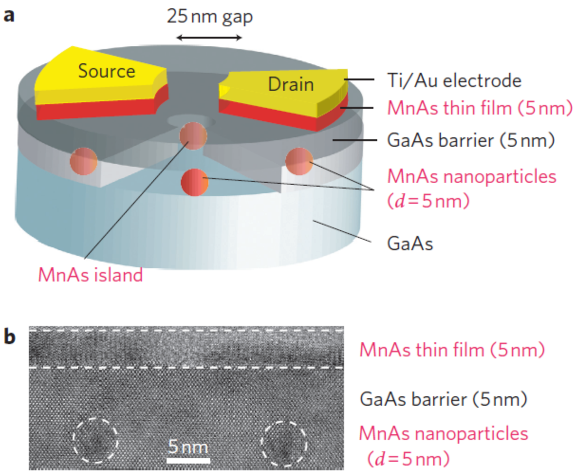

図１７　NiAs型MnAs微粒子を含む単電子スピンデバイス構造とその断面TEM像.
（P. N. Hai *et al.*, Nature Nanotech., **5** (2010) 593.）

鈴木グループは、反強磁性結合多層膜や反強磁性体などのスピン波とスピン流との結合機構を解明し、スピン流の超高速ダイナミクスの学理を確立するとともに、スピン流高周波・ミリ波・THz波デバイスの可能性を明らかにすることを第一の目的とした研究を行った。また、未踏の研究領域であるスピン流の熱力学について、スピン流による熱の輸送・ 吸収、熱によるスピン流の発生などスピン流に関する非平衡熱力学の確立につながる知見を得ることを第二の研究目的とした。その結果、図１８に示すように、強磁性層間の反強磁性的な磁気結合を利用して20 GHzを超える磁気共鳴モードをつくり、このモードを電流の直接通電により誘起することに成功した（T. Seki *et al.*, Appl. Phys. Lett., 2010）。ボルツマン方程式に基づく理論を構築し、強磁性体中の熱勾配によりスピン流が発生すること、非平衡なスピン波により大きなゼーベック効果が期待できることを示した（A. A. Tulapurkar *et al.*, Solid State

Commun., 2010)。さらに、拡散的なスピン流の発生に伴うエネルギーの散逸についての理論を構築した（Tulapukar *et al.*, Phys. Rev. B, 2011）。また、トンネル磁気抵抗素子が半導体を超える高周波の整流作用を示すことを実証した（S. Ishibashi *et al.*, Appl. Phys. Exp., 2010）。

清水グループは、宗片グループと共同で図１９に示すエピタキシャル強磁性MnSbを用いた半導体光アイソレータの作製に成功し、半導体光アイソレータの消光比12 dB/mmの実現と、80度までの高温動作に成功した（T. Amemiya *et al.*, Appl. Phys. Exp., 2008）。また、磁化状態で発振状態を制御可能な非相反半導体レーザを作製した。以上の研究成果を発展させ、非相反偏光回転に基づく半導体光アイソレータの実現（H. Shimizu *et al.*, Appl. Phys. Exp., 2010）や、一方向発振リングレーザの実現（H. Shimizu *et al.*, Appl. Phys. Exp., 2011）に成功した。非相反半導体レーザでは光の強度やモード分布を磁化反転によって制御することができ、再構成可能な光バッファリングメモリや非線形光デバイス、高速の光信号処理/記録への応用が可能になる。

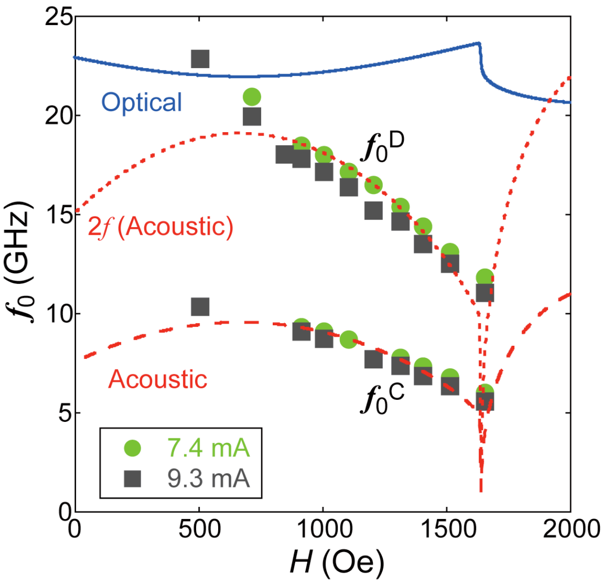

図１８　反強磁性結合膜の高周波発振．光学モードと考えられる20GHzを超える高周波の発振に成功した．（T. Seki, *et al.*, Appl. Phys. Lett., **97** (2010) 162508.）

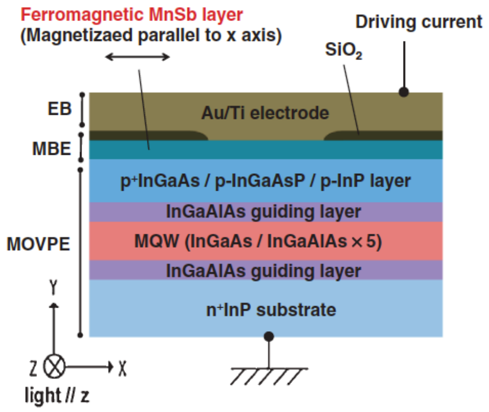

図１９　エピタキシャル強磁性金属MnSbを用いた半導体導波路光アイソレータの素子構造．（T. Amemiya *et al.*, Appl. Phys. Exp., **1** (2008)

仲谷グループは、磁気渦の磁化反転の解析とこれを用いたデバイスの動作条件について計算機シミュレーションによる研究を行った。特に、小野グループ（A04班）が実験を行っている電流誘起による磁気コアの反転に着目し、電流密度が10^{11} A/cm^2 程度の場合、電流磁界の効果はほとんど見られないが、10^{12} A/cm^2 以上では、電流磁界の効果が非常に大きく、反転電流が半減することを示した(K. Yamada, *et. al.*, Appl Phys. Lett., 2008)。また、円盤形状とその向きを調整することにより、反転電流を低減可能であることを示した（K. Yamada, *et. al.*, Appl. Phys. Lett., 2010）。磁気渦を用いたデバイスの安定動作には、磁化反転後に単磁区構造が現れずに磁気渦構造が出現する必要があるが、そのための条件も示した。

公募研究としては、２つのグループ（福村、陽）が参加した。福村グループは、強磁性酸化物半導体の研究を行い、スパッタ法を用いて室温強磁性を示すルチル型CoドープTiO$_2$多結晶薄膜をガラス基板上に初めて作製した。さらに、SiO$_2$/TiO$_2$誘電多層膜を積層した1次元磁気フォトニック結晶の作製により、磁気光学効果を300%以上増大させることに成功した。一方、パルスレーザー堆積法により、より低キャリア濃度で室温強磁性を発現するアナターゼ型CoドープTiO$_2$薄膜のエピタキシャル成長も行い、室温で強磁性の電界制御を可能にした（Y. Yamada *et al.*, Science, 2011）。陽グループは、InAs系スピントランジスタの非弾性領域での動作実証を行った。InAsナノワイヤトランジスタのプロセス開発を行い、ゲート電圧の変化により1.7 μmのチャンネル長を持つInAsナノワイヤスピントランジスタの大きな電流変調が室温で観測できた。

５． 研究成果の取りまとめの状況

本年度は、成果取りまとめ経費として３百万円の助成金をいただき、作業を進めている。

成果取りまとめ経費の大部分は、最終成果報告会を兼ねて開催される国際ワークショップの経費（会場費、印刷費、招待講演者旅費等）として使用する予定である。国際ワークショップの概要は以下のとおりである。

会議名　：5th International Workshop on Spin Currents

開催場所：仙台国際センター

開催時期：2011 年 7 月 25 日（月）～28 日（木）

委　員　：領域代表を組織委員長、各班長を組織委員、総括班研究協力者および A. Fert 博士（2007 年ノーベル物理学賞受賞）を諮問委員とした。

講演構成：

口頭発表（すべて招待講演）：41 件（海外：15 件，国内：26 件，うち特定領域関係者による講演は 23 件）

ポスター発表（公募）：81 件（海外：2 件，国内：79 件，うち特定領域関係者者による講演は 64 件）

会議内容：

スピン流研究における最近の特に注目される議題として、以下の５項目、①スピンホール効果やスピンゼーベック効果に代表される純粋スピン流現象、②スピン注入磁化反転や自励発振、電流誘起磁壁駆動などのスピントランスファー現象、③非磁性体、特に半導体へのスピン注入、④磁化の電気的あるいは光学的制御、⑤スピン流の創出と制御のための材料探索・プロセス・評価、を取り上げ、それぞれの分野において世界最先端の成果を上げている研究者を組織委員会で選出し、口頭発表をお願いした。ポスター発表ではスピン流研究全般について、広く一般から公募した。

出　版　：

ワークショップ開催時に、概要集を出版、公開する。プロシーディングスは出版しないが、ワークショップの内容は来年度作成の最終成果報告書（冊子体、様式C-18）に記載する予定である。

ホームページ：http://spincurrents2011.imr.tohoku.ac.jp/Spincurrents2011.html

上記とは別に、本年４月時点で、各計画研究代表者および公募研究代表者から、領域設定期間中の成果に関するデータを収集した。収集したデータは、原著論文、解説、著書、国際会議発表、国内会議発表、報道（新聞、ＴＶ等）、受賞、特許、その他（若手育成など）、の９項目である。最終的な集計結果は、来年度作成の最終成果報告書（冊子体、様式C-18）に記載する予定であるが、現在の集計状況は以下のとおりである。

原著論文：640件

（うち，Nature系の雑誌 15件，Science 3件，Phys. Rev. Lett. 50件，Appl. Phys. Lett. 82件など.）

解　説　： 77件

著　書　： 24件

国際会議発表： 811件（うち，招待講演 272件）

国内会議発表：1204件（うち，招待講演 167件）

報　道：123件

受　賞： 49件

特　許： 21件

その他：若手育成については，33ページ参照.

６． 研究成果の公表の状況

（１）主な論文等一覧

原著論文、解説、著書合わせて、総数は **741** 件である。主要なものを以下に記す。

- 高梨弘毅*,「固体中におけるスピン流の創出と制御」, 応用物理, **77** (2008) 255.
  ［応用物理学会解説論文賞受賞］
- T. Seki*, Y. Hasegawa, S. Mitani, S. Takahashi, H. Imamura, S. Maekawa, J. Nitta, and K. Takanashi, "Giant spin Hall effect in perpendicularly spin-polarized FePt/Au devices", Nature Materials, **7** (2008) 125. ［citation: 75］
- S. Mitani*, Y. Nogi, H. Wang, K. Yakushiji, F. Ernult, and K. Takanashi, "Current-induced tunnel magnetoresistance due to spin accumulation in Au nanoparticles" Appl. Phys. Lett., **92** (2008) 152509. ［citation: 3］
- Y. Miura*, H. Uchida, Y. Oba, K. Abe, and M. Shirai, "Half-metallic interface and coherent tunneling in $Co_2YZ/MgO/Co_2YZ$ (YZ=MnSi, CrAl) magnetic tunnel junctions: A first-principles study", Phys. Rev. B **78** (2008) 064416. ［citation: 22］
- M. Tsujikawa*, A. Hirokawa, T. Oda "Magnetic Anisotropy of Fe/Pt(001) and Pt/Fe/Pt(001) using a first-principles approach", Phys. Rev. B **77** (2008) 054413. ［citation: 8］
- Y. Ishida*, M. Kobayashi, J. I. Hwang, Y. Takeda, S.-i. Fujimori, T. Okane, K. Terai, Y. Saitoh, Y. Muramatsu, A. Fujimori, J. Okabayashi, K. Kanai, K. Kubo, and M. Oshima, "X-Ray Magnetic Circular Dichroism and Photoemission Study of the Diluted Ferromagnetic Semiconductor $Zn_{1-x}Cr_xTe$", Appl. Phys. Express, **1** (2008) 041301. ［citation: 3］
- Y. Takeda*, M. Kobayashi, T. Okane, T. Ohkochi, J. Okamoto, Y. Saitoh, K. Kobayashi, H. Yamagami, A. Fujimori, A. Tanaka, J. Okabayashi, M. Oshima, S. Ohya, P. N. Hai, and M. Tanaka, "Nature of Magnetic Coupling between Mn Ions in As-Grown $Ga_{1-x}Mn_xAs$ Studied by X-Ray Magnetic Circular Dichroism", Phys. Rev. Lett., **100** (2008) 247202. ［citation: 6］
- T. Furubayashi*, K. Kodama, H. Sukegawa, Y. K. Takahashi, K. Inomata, and K. Hono, "Current-perpendicular-to-plane-magnetoresistance in spin-valve structures using epitaxial $Co_2FeAlSi/Ag/Co_2FeAlSi$ trilayers", Appl. Phys. Lett., **93** (2008) 122507. ［citation: 32］
- T. Yang, T. Kimura and Y. Otani*, "Giant spin-accumulation signal and pure spin-current-induced reversible magnetization switching", Nature Physics, **4** (2008) 851. ［citation: 33］
- M. Scheid*, M. Kohda, Y. Kunihashi, K. Richter and J. Nitta, "All-Electrical Detection of the Relative Strength of Rashba and Dresselhaus Spin-Orbit Interaction in Quantum Wires", Phys. Rev. Lett. **101** (2008) 266401. ［citation: 23］
- S. Honda*, H. Itoh, J. Inoue, H. Kurebayashi, T. Trypiniotis, C. H. W. Barnes, A. Hirohata, and J. A. C. Bland, "Spin polarization control through resonant states in an Fe/GaAs Schottky barrier", Phys. Rev. B **78** (2008) 245316. ［citation: 14］
- S. Onari*, Y. Ishikawa, H. Kontani, and J. Inoue "Intrinsic spin Hall effect in graphene, Numerical calculation in a multi-orbital model", Phys. Rev. B, **78** (2008) 121403R. ［citation: 6］
- T. Tanaka*, H. Kontani, M. Naito, T. Naito, D. S. Hirashima, K. Yamada, and J. Inoue "Study of intrinsic spin Hall effect and orbital Hall effect in 4d- and 5d- transition metals", Phys. Rev. B, **77** (2008) 165117. ［citation:25］
- H. Saito*, A. Yamamoto, S. Yuasa, and K. Ando, "High tunneling magnetoresistance in $Fe/GaO_x/Ga_{1-x}Mn_xAs$ with metal/insulator/semiconductor structure", Appl. Phys. Lett., **93** (2008) 172515. ［citation: 4］
- Y. Kondo, M. Ono, S. Matsuzaka, K. Morita, H. Sanada, Y. Ohno*, and H. Ohno, "Multipulse operation and optical detection of nuclear spin coherence in a GaAs/AlGaAs quantum well," Phys. Rev. Lett., **101** (2008) 207601. ［citation: 9］

- Y. Hashimoto*, S. Kobayashi, and H. Munekata, “Photo-induced precession of magnetization in ferromagnetic (Ga,Mn)As”, Phys. Rev. Lett., **100** (2008) 067202. 〔citation: 27〕
- J. Wang, L. Cywinski, C. Sun, J. Kono*, H. Munekata, and L.J. Sham, “Femtosecond demagnetization and hot-hole relaxation in ferromagnetic $Ga_{1-x}Mn_xAs$”, Phys. Rev. B **77** (2008) 235308. 〔citation: 11〕
- S. Mizukami*, H. Abe, D. Watanabe, M. Oogane*, Y. Ando, and T. Miyazaki, “Gilbert damping for Various $Ni_{80}Fe_{20}$ Thin Films Investigated Using All-Optical Pump-Probe Detection and Ferromagnetic Resonance”, Appl. Phys. Express **1** (2008) 121301. 〔citation: 2〕
- S. Tsunegi*, Y. Sakuraba, M. Oogane, K. Takanashi and Y. Ando, “Large tunnel magnetoresistance in magnetic tunnel junctions using a Co_2MnSi Heusler alloy electrodes and a MgO barrier”, Appl. Phys. Lett., **93** (2008) 112506. 〔citation: 53〕
- T. Taniguchi, S. Yakata, H. Imamura, Y. Ando, “Determination of Penetration Depth of Transverse Spin Current in Ferromagnetic Metals by Spin Pumping”, Appl. Phys. Exp., **1** (2008) 031302. 〔citation: 6〕
- G.Y. Guo*, S. Murakami, T.-W. Chen, and N. Nagaosa, “Intrinsic spin Hall effect in platinum metal”, Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 096401. 〔citation: 27〕
- K. Uchida, S. Takahashi, K. Harii, J. Ieda, W. Koshibae, K. Ando, S. Maekawa, and E. Saitoh*, “Observation of the spin-Seebeck effect”, Nature, **455** (2008) 778. 〔citation: 76〕
- K. Ando*, S. Takahashi, K. Harii, K. Sasage, J. Ieda, S. Maekawa, and E. Saitoh, “Electric Manipulation of Spin Relaxation Using Spin Hall Effect”, Phys. Rev. Lett., **101** (2008) 036601. 〔citation: 30〕
- K. Ando*, Y. Kajiwara, S. Takahashi, S. Maekawa, K. Takemoto, M. Takatsu, and E. Saitoh “Angular dependence of inverse spin-Hall effect induced by spin pumping investigated in a $Ni_{81}Fe_{19}$/Pt thin film”, Phys. Rev. B, **78** (2008) 014413. 〔citation: 29〕
- A. Aharony*, O. Entin-Wohlman, Y. Tokura, and S. Katsumoto, “Spin filtering by a periodic spintronic device”, Phys. Rev. B **78** (2008) 125328. 〔citation: 14〕
- T. Otsuka*, E. Abe, Y. Iye, S. Katsumoto “Potential dependent intra-dot Coulomb interaction in quantum dots side-coupled to quantum wires”, Physica E, **40** (2008) 1270. 〔citation: 0〕
- S. Kasai*, P. Fischer, M-Y. Im, K. Yamada, Y. Nakatani, K. Kobayashi, H. Kohno, and T. Ono, “Probing the Spin Polarization of Current by Soft X-Ray Imaging of Current-Induced Magnetic Vortex Dynamics”, Phys. Rev. Lett., **101** (2008) 237203. 〔citation: 13〕
- S. Kasai*, K. Nakano, K. Kondou, N. Ohshima, K. Kobayashi, and T. Ono “Three-Terminal Device Based on the Current-Induced Magnetic Vortex Dynamics with the Magnetic Tunnel Junction”, Appl. Phys. Exp., **1** (2008) 91302. 〔citation: 8〕
- G. Tatara*, H. Kohno, and J. Shibata, “Microscopic Approach to Current-Induced Domain Wall Dynamics”, Phys. Rep., **468** (2008) 213. 〔citation: 54〕
- A. M. Nazmul*, H.T. Lin, S.N. Tran, S. Ohya, and M. Tanaka, “Planar Hall effect and uniaxial in-plane magnetic anisotropy in a Mn delta-doped GaAs/p-AlGaAs heterostructure“, Phys. Rev. B **77** (2008) 155203. 〔citation: 6〕
- T. Amemiya*, Y. Ogawa, H. Shimizu, H. Munekata, and Y. Nakano, “Semiconductor Waveguide Optical Isolator Incorporating Ferromagnetic Epitaxial MnSb for High Temperature Operation“, Appl. Phys. Express, **1** (2008) 022002. 〔citation: 5〕
- H. Kubota*, A. Fukushima, K. Yakushiji, T. Nagahama, S. Yuasa, K. Ando, H. Maehara, Y. Nagamine, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe, and Y. Suzuki, “Quantative measurement of voltage dependence of spin-transfer torque in MgO-based magnetic tunnel junctions“, Nature Physics, **4** (2008) 37. 〔citation: 96〕
- Y. Nakatani*, J. Shibata, G. Tatara, H. Kohno, A. Thiaville, and J. Miltat, “Nucleations and

dynamics of magnetic vortices under spin-polarized current", Phys. Rev. B **77** (2008) 014439. [citation: 7]

- K. Yamada*, S. Kasai, Y. Nakatani, K. Kobayashi, and T. Ono, "Switching magnetic vortex core by a single nanosecond current pulse", Appl. Phys. Lett., **93** (2008) 152502. [citation: 10]
- T. Yamasaki*, T. Fukumura, M. Nakano, K. Ueno, M. Kawasaki, "Room temperature ferromagnetic semiconductor rutile $Ti_{1-x}Co_xO_{2-\delta}$ epitaxial thin films grown by sputtering method", Appl. Phys. Express, **1** (2008) 111302. [citation: 1]
- T. Iwase, Y. Sakuraba*, S. Bosu, K. Saito, S. Mitani, and K. Takanashi, "Large interface spin-asymmetry and magnetoresistance in fully epitaxial $Co_2MnSi/Ag/Co_2MnSi$ current-perpendicular-to-plane magnetoresistive devices", Appl. Phys. Express, **2** (2009) 063003. [citation: 22]
- T. Ishikawa, N. Itabashi, T. Taira, K.-i Matsuda, T. Uemura, and M. Yamamoto*, "Half-metallic electronic structure of Co_2MnSi electrodes in fully epitaxial $Co_2MnSi/MgO/Co_2MnSi$ magnetic tunnel junctions investigated by tunnel spectroscopy (invited)", J. Appl. Phys., **105** (2009) 07B110. [citation: 8]
- T. Ishikawa, H.-x. Liu, T. Taira, K.-i. Matsuda, Y. Uemura and M. Yamamoto* "Influence of film composition in Co_2MnSi electrodes on tunnel magnetoresistance characteristics of $Co_2MnSi/MgO/Co_2MnSi$ magnetic tunnel junctions", Appl. Phys. Lett., **95** (2009) 232512. [citation: 9]
- A. Narahara*, K. Ito, T. Suemasu, Y. K. Takahashi, A. Rajanikanth and K. Hono, "Spin polarization of Fe_4N thin films determined by point-contact Andreev reflection", Appl. Phys. Lett., **94** (2009) 202502. [citation: 5]
- H. Komatsu, R. Mogi, M. M. Matsushita, T. Miyagi, Y. Kawada, and T. Sugawara* "Synthesis and properties of TSF-based spin-polarized donor", Polyhedron, **28** (2009) 1996. [citation: 1]
- T. Kawagoe*, M. Geshi, T. Miyamachi, and S. Suga, "Spin-polarized Surface states of metastable bcc Co(001)", Appl. Phys. Express, **2** (2009) 043001. [citation: 1]
- Y. Kunihashi*, M. Kohda, and J. Nitta "Enhancement of Spin Lifetime in Gate-Fitted InGaAs Narrow Wires", Phys. Rev. Le tt., **102** (2009) 226601. [citation: 17]
- H. Kontani*, T. Tanaka, D. S. Hirashima, K. Yamada, and J. Inoue. "Giant Orbital Hall effect in transition metals: origin of large spin and anomalous Hall effects", Phys. Rev. Lett., **102** (2009) 016601. [citation: 12]
- J. Inoue*, T. Tanaka, and H. Kontani "Anomalous and spin Hall effects in magnetic granular films", Phys. Rev. B, **80** (2009) 020405R. [citation: 1]
- K. Sadakuni*, T. Harianto, H. Akinaga, and T. Suemasu, "$CaF_2/Fe_3Si/CaF_2$ Ferromagnetic Resonant Tunnleing Diodes on Si(111) by Molecular Beam Epitaxy," Appl. Phys. Express, **2** (2009) 063006. [citation: 1]
- H. Saito*, J. C. Le Breton, V. Zayets, S. Yuasa, and K. Ando, "Highly enhanced electron-injection efficiency in GaAs-based light-emitting diodes using a Fe/GaO_x tunnel injector", Appl. Phys. Express, **2** (2009) 083003. [citation: 3]
- J. C. Le Breton*, H. Saito, S. Yuasa and K. Ando "Low effective barrier height of GaOx tunnel barrier in metal/semiconductor hybrid junctions", Appl. Phys. Lett., **94** (2009) 152101. [citation: 5]
- S. Matsuzaka*, Y. Ohno, and H. Ohno, "Electron density dependence of the spin Hall effect in GaAs probed by scanning Kerr rotation microscopy", Phys. Rev. **B 80** (2009) 241305. [citation: 1]
- L. Jiang, H. Naganuma*, M. Oogane, and Y. Ando, "Large Tunnel Magnetoresistance of 1056% at Room Temperature in MgO Based Double Barrier Magnetic Tunnel Junction", Appl. Phys. Express, **2** (2009) 083002. [citation: 25]
- G. Y. Guo*, S. Maekawa, and N. Nagaosa, "Enhanced Spin Hall Effect by Resonant Skew

Scattering in the Orbital-Dependent Kondo Effect”, Phys. Rev. Lett., **102** (2009) 036401. ［citation: 17］

- J. Ohe*, S. E. Barnes, H. W. Lee, S. Maekawa, “Electrical measurements of the polarization in a moving magnetic vortex”, Appl. Phys. Lett., **95** (2009) 123110. ［citation: 3］
- S.-M. Seo, K.-J. Lee*, H.-S. Yang, and T. Ono, “Current-Induced Control of Spin-Wave Attenuation”, Phys. Rev. Lett., **102** (2009) 147202. ［citation: 16］
- T. Otsuka*, E. Abe, Y. Iye and S. Katsumoto, “Detection of spin polarization with a side-coupled quantum dot”, Phys. Rev. **B 79** (2009) 195313. ［citation: 2］
- H. Suzuki*, H. Endo, T. Nakamura, T. Tanaka, M. Doi, S. Hashimoto, H. N. Fuke, M. Takagishi, H. Iwasaki, and M. Sahashi, “Characteristics of microwave oscillations induced by spin-transfer-torque in a ferromagnetic nanocontact magneto resistive element”, J. Appl. Phys. **105** (2009) 07D124. ［citation: 6］
- P. N. Hai, S. Ohya, M. Tanaka*, S. E. Barnes, S. Maekawa, “Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic tunnel junctions”, Nature, **458** (2009) 489. ［citation: 14］
- S. Ohya*, I. Muneta, P. N. Hai, and M. Tanaka, "GaMnAs-based magnetic tunnel junctions with an AlMnAs barrier", Appl. Phys. Lett., **95** (2009) 242503. ［citation: 2］
- K. Ohta*, T. Maruyama, T. Nozaki*, M. Shiraishi, T. Shinjo, Y. Suzuki, S.-S. Ha, C.-Y. You, and W. Van Roy, “Voltage control of in-plane magnetic anisotropy in ultrathin Fe/n-GaAs(001) Schottky junctions”, Appl. Phys. Lett., **94** (2009) 032501. ［citation: 4］
- T. Seki*, H. Tomita, A. A. Tulapurkar, M. Shiraishi, T. Shinjo, and Y. Suzuki, “Spin-transfer-torque-induced ferromagnetic resonance for Fe/Cr/ Fe layers with an antiferromagnetic coupling field”, Appl. Phys. Lett., **94** (2009) 212505. ［citation: 1］
- D. Hatanaka, S. Tanabe, H. Kusai, R. Nouchi, T. Nozaki, T. Shinjo, Y. Suzuki, H. Wang, K. Takanashi, and M. Shiraishi*, “Enhanced magnetoresistance due to charging effects in a molecular nanocomposite spin device”, Phys. Rev. B **79** (2009) 235402 ［citation: 3］
- Y. Sakuraba*, K. Takanashi, Y. Kota, T. Kubota, M. Oogane, A. Sakuma and Y. Ando “Evidence of Fermi level control in a half-metallic Heusler compound Co_2MnSi by Al doping: Comparison of measurements with first-principles calculations”, Phys. Rev. **B 81** (2010) 144422. ［citation: 6］
- Y. Sakuraba*, K. Izumi, T. Iwase, S. Bosu, K. Saito, K. Takanashi, Y. Miura, K. Futatsukawa, K. Abe and M. Shirai “Mechanism of large magnetoresistance in Co2MnSi/Ag/Co2MnSi devices with current perpendicular to the plane”, Phys. Rev. B., **82** (2010) 094444. ［citation: 6］
- T. Saito*, T. Katayama, T. Ishikawa, M. Yamamoto, D. Asakura, T. Koide, M. Miura, and M. Shirai “Interface Structure of Half-Metallic Heusler Alloy Co2MnSi Thin Films Facing an MgO Tunnel Barrier Determined by X-ray Magnetic Circular Dichroism”, Phys. Rev. B., **81** (2010) 144417. ［citation: 1］
- T.M. Nakatani*, Y.K. Takahashi, T. Ishikawa, M. Yamamoto and K. Hono “Structural characterizations of Co2MnSi/MgO/Co2MnSi magnetic tunnel junctions by transmission electron microscopy”, J. Magn. Magn. Mater., **322** (2010) 357. ［citation: 1］
- S. Isogami, M. Tsunoda*, Y. Komasaki, A. Sakuma, and M. Takahashi “Inverse Current-Induced Magnetization Switching in Magnetic Tunnel Junctions with Fe4N Free Layer”, Appl. Phys. Exp., **3** (2010) 103002. ［citation: 1］
- S. Honda*, H. Itoh, and J. Inoue, “Bias dependence of spin-polarized tunnel current through Fe/GaAs and Fe/GaAs/Fe junctions,” J. Phys. D: Appl. Phys., **43** (2010) 135002. ［citation: 2］
- M. Kohda* and J. Nitta, “Enhancement of spin orbit interaction and the effect of interface diffusion in InGaAsP/InGaAs heterostructures,” Phys. Rev., **B 81** (2010) 115118. ［citation: 1］
- K. S. Makabe, M. Suzuno, K. Harada, H. Akinaga, and T. Suemasu, “Improved Reproducibility in $CaF_2/Fe_3Si/CaF_2$ Ferromagnetic Resonant Tunneling Diodes on Si(111) Substrates by Selected-Area

Molecular Beam Epitaxy", Jpn. J. Appl. Phys., **49** (2010) 060212. [citation: 0]

- H. Saito*, J. C. Le Breton, V. Zayets, Y. Mineno, S. Yuasa and K. Ando "Efficient spin injection into semiconductor from an Fe/GaOx tunnel injector", Appl. Phys. Lett., **96** (2010) 012501. ［citation: 2］
- S. Moritsubo, T. Murai, T. Shimada, Y. Murakami, S. Chiashi, S. Maruyama, Y. K. Kato*, "Exciton diffusion in air-suspended single-walled carbon nanotubes", Phys. Rev. Lett., **104** (2010) 247402. ［citation: 3］
- M. Ono, H. Kobayashi, S. Matsuzaka, Y. Ohno*, and H. Ohno, "Gate voltage dependence of nuclear spin relaxation in an impurity-doped semiconductor quantum well," Appl. Phys. Lett., **96** (2010) 071907. ［citation: 3］
- S. Kobayashi*, K. Suda, J. Aoyama, D. Nakahara, and H. Munekata "Photo-Induced Precession of Magnetization in Metal/(Ga, Mn)As Systems", IEEE Trans. Magn., **46** (2010) 2470. ［citation: 0］
- S. Mizukami*, E. P. Sajitha, D. Watanabe, F. Wu, T. Miyazaki, H. Naganuma, M. Oogane, and Y. Ando, "Gilbert damping in perpendicularly magnetized Pt/Co/Pt films investigated by all-optical pump-probe technique Appl. Phys. Lett., **96** (2010) 152502. ［citation: 7］
- Y. Onose*, T. Ideue, H. Katsura, Y. Shiomi, N. Nagaosa, Y. Tokura, "Observation of the Magnon Hall Effect", Science, **329** (2010) 297. ［citation: 5］
- H. Yang, S.H. Yang, S. Takahashi, S. Maekawa, and S.S.P. Parkin*, "Extremely long quasiparticle spin lifetimes in superconducting aluminium using MgO tunnel spin injectors", Nature Materials, **9** (2010) 586. ［citation: 0］
- B. Gu, J.Y. Gan, N. Bulut, T. Ziman, G.Y. Guo, N. Nagaosa, and S. Maekawa*, "Quantum Renormalization of the Spin Hall Effect", Phys. Rev. Lett., **105** (2010) 086401. ［citation: 4］
- B. Gu, I. Sugai, T. Ziman, G.Y. Guo, N. Nagaosa, T. Seki, K. Takanashi, and S. Maekawa*, "Surface-assisted spin Hall effect in Au films with Pt impurities", Phys. Rev. Lett., **105** (2010) 216401. ［citation: 3］
- H. Adachi*, K. Uchida, E. Saitoh, J. Ohe, S. Takahashi, and S. Maekawa "Gigantic enhancement of spin Seebeck effect by phonon drag", Appl. Phys. Lett., **97** (2010) 252506. ［citation: 2］
- Y. Kajiwara, K. Harii, S. Takahashi, J. Ohe, K. Uchida, M. Mizuguchi, H. Umezawa, H. Kawai, K. Ando, K. Takanashi, S. Maekawa and E. Saitoh*, "Transmission of electric signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator", Nature, **464** (2010) 262. ［citation: 25］
- K. Uchida, J. Xiao, H. Adachi, J. Ohe, S. Takahashi, J. Ieda, T. Ota, Y. Kajiwara, H. Umezawa, H. Kawai, G. E. W. Bauer, S. Maekawa, and E. Saitoh*, "Spin Seebeck insulator", Nature Materials, **9** (2010) 894. ［citation: 14］
- K. Ando*, M. Morikawa, T. Trypiniotis, Y. Fujikawa, C. H. W. Barnes, E. Saitoh, "Photo-induced inverse spin-Hall effect: conversion of light-polarization information into electric voltage", Appl. Phys. Lett., **96** (2010) 082502. ［citation: 4］
- K. Nakano*, D. Chiba, K. Sekiguchi, S. Kasai, N. Ohshima, K. Kobayashi, T. Ono "Electrical detection of vortex core polarity in ferromagnetic disk", Appl. Phys. Exp., **3** (2010) 53001. ［citation: 1］
- K. Yamada*, S. Kasai, Y. Nakatani, K. Kobayashi, and T. Ono "Current-induced switching of magnetic vortex core in ferromagnetic elliptical disks", Appl. Phys. Lett., **96** (2010) 192508. ［citation: 2］
- A. Takeuchi*, K. Hosono, G. Tatara, "Diffusive versus local spin currents in dynamic spin pumping systems", Phys. Rev. **B 81** (2010) 144405. ［citation: 6］
- Y. Takezoe*, K. Hosono, A. Takeuchi and G. Tatara "Theory of spin transport induced by a temperature gradient", Phys. Rev. B, **82** (2010) 094451. ［citation: 1］
- K. Hosono*, A. Takeuchi, and G. Tatara "Perturbation theory of the dynamic inverse spin Hall effect with charge conservation", J. Phys. Soc. Jpn., **79** (2010) 014708. ［citation: 3］
- S. Ohya*, I. Muneta, and M. Tanaka,

"Quantum-level control in a III-V-based ferromagnetic- semiconductor heterostructure with a GaMnAs quantum well and double barriers", Appl. Phys. Lett., **96** (2010) 052505. ［citation: 2］

- P. N. Hai, S. Ohya, and M. Tanaka*, "Long spin-relaxation time in a single metal nanoparticle", Nature Nanotechnology, **5** (2010) 593. ［citation: 2］
- S. Ohya*, I. Muneta, P. N. Hai, and M. Tanaka "Valence-Band Structure of the Ferromagnetic Semiconductor GaMnAs Studied by Spin-Dependent Resonant Tunneling Spectroscopy", Phys. Rev. Lett., **104** (2010) 167204. ［citation: 4］
- R. Nakane*, T. Harada, K. Sugiura, S. Sugahara, and M. Tanaka "Magnetoresistance of a Spin Metal/Oxide/Semiconductor Field-Effect Transistor with Ferromagnetic MnAs Source and Drain Contacts", Jpn. J. Appl. Phys., **49** (2010) 113001. ［citation: 0］
- Y. Shuto*, R. Nakane, W. Wang, H. Sukegawa, S. Yamamoto, M. Tanaka, K. Inomata, and S. Sugahara "A new spin-functional MOSFET based on magnetic tunnel junction technology: pseudo-spin-MOSFET", Appl. Phys. Exp., **3** (2010) 013003. ［citation: 2］
- T. Seki*, H. Tomita, T. Shinjo, and Y. Suzuki "rf auto-oscillations in antiferromagnetically coupled layers with different coupling strengths", Appl. Phys. Lett., **97** (2010) 162508. ［citation: 0］
- A. A. Tulapurkar and Y. Suzuki* "Contribution of electron-magnon scattering to spin-dependent Seebeck effect in a ferromagnet", Solid State Comm., **150** (2010) 466. ［citation: 3］
- S. Ishibashi*, T. Seki, T. Nozaki, H. Kubota, S. Yakata, A. Fukushima, S. Yuasa, H. Maehara, K. Tsunekaw, D. D. Djayaprawir, and Y. Suzuki "Large Diode Sensitivity of CoFeB/MgO/CoFeB Magnetic Tunnel Junctions", Appl. Phys. Exp., **3** (2010) 073001. ［citation: 0］
- H. Shimizu*, S. Goto, and T. Mori "Optical Isolation Using Nonreciprocal Polarization Rotation in Fe-InGaAlAs/InP Semiconductor Active Waveguide Optical Isolators", Appl. Phys. Exp., **3** (2010) 072201. ［citation: 1］
- Y. Yamazaki*, T. Kataoka, V. R. Singh, A. Fujimori, F. -H. Chang, D. -J. Huang, H. -J. Lin, C. T. Chen, K. Ishikawa, K. Zhang, S. Kuroda "Effect of co-doping of donor and acceptor impurities in the ferromagnetic semiconductor $Zn_{1-x}Cr_xTe$ studied by soft x-ray magnetic circular dichroism", Journal of Physics: Condensed Matter, **23** (2011) 176002. ［citation: 0］
- Y. Niimi*, M. Morota, D. H. Wei, C. Deranlot, M. Basletic, A. Hamzic, A. Fert, and Y. Otani "Extrinsic spin Hall effect induced by Iridium impurities in Copper", Phys. Rev. Lett., **106** (2011) 126601. ［citation: 2］
- M. Morota, Y. Niimi*, K. Ohnishi, D. H. Wei, T. Tanaka, H. Kontani, T. Kimura, and Y. Otani, "Indication of intrinsic spin Hall effect in 4d and 5d transition metals", Phys. Rev. B, **83** (2011) 174405. [citation: 0]
- M. Mostovoy, K. Nomura, and N. Nagaosa*, "Theory of Electric Polarization in Multiorbital Mott Insulators", Phys. Rev. Lett., **106** (2011) 047204. ［citation: 0］
- S. Mizukami*, F. Wu, A. Sakuma, J. Walowski, D. Watanabe, T. Kubota, X. Zhang, H. Naganuma, M. Oogane, Y. Ando, and T. Miyazaki, ""Long-Lived Ultrafast Spin Precession in Manganese Alloys Films with a Large Perpendicular Magnetic Anisotropy"", Phys. Rev. Lett., **106** (2011) 117201. ［citation: 0］
- Y. Hashimoto*, H. Amano, Y. Iye, S. Katsumoto "Magnetization Dependent Current Rectification in (Ga,Mn)As Magnetic Tunnel Junctions", Appl. Phys. Exp., **4** (2011) 063004. ［citation: ?］
- M. Matsuo, J. Ieda, E. Saitoh, and S. Maekawa*, "Effects of mechanical rotation on spin currents", Phys. Rev. Lett., **106** (2011) 076601. ［citation: 0］
- H. Adachi*, J. Ohe, S. Takahashi, and S. Maekawa "Linear-response theory of spin Seebeck effect in ferromagnetic insulators", Phys. Rev. B, **83** (2011) 094410. ［citation: 2］
- J. Ohe*, H. Adachi, S. Takahashi, and S. Maekawa "Numerical study on the spin Seebeck effect", Phys. Rev. B, **83** (2011) 115118. ［citation: 0］
- Y. Yamane, J. Ieda, J. Ohe, S. E. Barnes, and S. Maekawa, "Equation-of-motion approach of

spin-motive force", J. Appl. Phys., **109** (2011) 07C735. [citation: 0]
- S. Ohya*, K. Takata, and M. Tanaka*, "Nearly non-magnetic valence band of the ferromagnetic semiconductor GaMnAs", Nature Physics, **7** (2011) 342. ［citation: 1］
- A. A. Tulapurkar and Y. Suzuki* "Boltzmann approach to dissipation produced by a spin-polarized current", Phys. Rev. B, **83** (2011) 012401. ［citation: 1］
- H. Shimizu*, Y. Kono, S. Goto, and T. Mori "Demonstration of a Magnetically Controllable Fabry-Perot Laser and an Unidirectional Ring Laser Utilizing a Nonreciprocal Semiconductor Optical Amplifier", Appl. Phys. Exp., **4** (2011) 022201. ［citation: 0］
- Y. Yamada, K. Ueno, T. Fukumura*, H. T. Yuan, H. Shimotani, Y. Iwasa, L. Gu, S. Tsukimoto, Y. Ikuhara, and M. Kawasaki, "Electrically induced ferromagnetism at room temperature in cobalt-doped titanium dioxide", Science, **332** (2011) 1065. ［citation: 1］
- G. H. Lee, K. Ito, and T. Suemasu "Toward the epitaxial growth of ferromagnetic γ'-Fe4N on Si(100) substrate by molecular beam epit", Physics Procedia, **11** (2011) 193. ［citation: 0］
- Y. Fukuma, L. Wang, H. Idzuchi, S. Takahashi, S. Maekawa, and Y. Otani, "Giant enhancement of spin accumulation and long-distance spin precession in metallic lateral spin valves", Nature Mater., online published (2011). ［citation: 0］

（２）ホームページについて

領域設定後、直ちにホームページを立ち上げた。総括班メンバーの中で広報を担当した京都大学化学研究所の小野輝男教授（A04 班班長）が作成、管理した。

URL: http://www.scl.kyoto-u.ac.jp/~ono/tokutei/public_html/

ホームページでは、研究組織や研究内容を一般向けに紹介すると同時に、研究会や成果報告会などの関連行事の案内も行い、領域内のコミュニケーションにも役立てた。また、Nature 系の雑誌に掲載されたような、特に顕著な成果については、その概要を掲載した。領域関係者の受賞についても、ニュースとして掲載した。

（３）公開発表について

領域設定後、直ちにキックオフミーティングとしての研究会を開催し、以後、夏の研究会、冬の成果報告会という形で毎年２回、研究発表の場を設けた。以下に、その期日と場所、参加人数を記す。

2007年10月 4~5日	東北大学	70名（キックオフミーティング）
2008年 2月27~28日	東京大学	120名
2008年 7月22~24日	京都大学	120名
2009年 1月 7~8日	東北大学	111名
2009年 8月 9~11日	北海道大学	128名
2010年 1月13~14日	東京大学	148名
2010年 6月23~25日	京都大学	141名
2011年 1月 6~7日	東京大学	130名

研究会／成果報告会は常に一般に公開した形で開催され、参加者は毎回100名を超え、領域内の情報交換とともに、成果の外部発信にも役立った。

また、以下に示すように、さまざまな学会主催のシンポジウムや国際的なワークショップなどを協賛し、領域の成果の一部を公表する場としても活用した。

2008年 2月18~19日	2nd International Workshop on Spin Currents（東北大学）
2008年 5月27日	P. Grünberg博士ノーベル賞受賞記念講演会（東北大学）
2009年 1月 6日	日本金属学会 分科会シンポジウム（東北大学） 「スピントロニクス・ナノ磁性材料の進展と将来展望」
2009年 1月27~28日	第13回半導体スピン工学の基礎と応用 PASPS-13（東北大学）

2009年11月 2日	日本磁気学会 第168回研究会（東北大学） 「スピン流とデバイス応用」
2010年 2月 5~6日	6th RIEC International Workshop on Spintronics（東北大学）
2010年 2月 8~10日	4th International Workshop on Spin Currents（東北大学）
2010年 3月29~30日	日本金属学会 公募シンポジウム（筑波大学） 「スピン流の創出と制御のための材料創製と評価」
2010年 8月 1~4日	6th International Conference on the Physics and Applications of Spin-Related Phenomena in Semiconductors PASPS VI（東京大学）
2010年 8月19~20日	2010年度 物理学会 科学セミナー（東京大学） 「スピントロニクス–最先端の物理と技術」
2010年 9月 5日	日本磁気学会 学術講演会 シンポジウム（筑波大学） "Recent Progress on Spin Current Research"
2010年12月20~21日	第15回半導体スピン工学の基礎と応用 PASPS-15（筑波大学）

本領域関係者による招待講演は、国内会議 **167** 件、国際会議 **272** 件にのぼる。主な招待講演を以下に記す（下線が登壇者）。

＜国内会議＞

- 大谷義近："Spin current manipulation in magnetic nanostructures"
  日立スピントロニクスワークショップ，東京，2008 年 11 月 2 日.
- 田中雅明：「半導体スピントロニクス材料」，
  日本金属学会分科会シンポジウム，仙台，2009 年 1 月 6 日.
- 高梨弘毅：「固体中におけるスピン流の創出と制御」
  第 70 回応用物理学会学術講演会 解説論文賞受賞記念講演，富山，2009 年 9 月 10 日.
- 田中雅明：「スピン起電力と巨大磁気抵抗効果」
  日本物理学会秋季講演会シンポジウム，熊本，2009 年 9 月 26 日.
- 高梨弘毅：「スピン流とスピントロニクス」，電子情報技術産業協会（JEITA）半導体技術ロードマップ（STRJ）専門委員会ワークショップ，東京，2010 年 3 月 5 日.
- 大野裕三：「半導体へのスピン注入とスピンダイナミクスの光検出」
  電子情報通信学会 2010 年総合大会，仙台，2010 年 3 月 16 日.
- 齊藤英治：「スピントロニクスとスピン流」
  第 29 回電子材料シンポジウム，静岡，2010 年 7 月 14 日.
- 多々良源：「スピントロニクスにおける電磁気学：再考か必要か?」
  日本磁気学会 第 175 回研究会，東京，2010 年 12 月 17 日.

＜国際会議＞

- S. Maekawa: "Non-Local Spin Transport and Spin Motive Force in Magnetic Nanostructures",
  53rd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2008),
  Austin, USA, Novermber 13, 2008.
- M. Yamamoto, T. Ishikawa, K.-i. Matsuda, and T. Uemura: "Spin-polarized tunneling in fully epitaxial magnetic tunnel junctions with Heusler alloy thin films and a MgO barrier",
  Material Research Society (MRS) Fall Meeting, Boston, USA, December 2, 2008.
- T. Ono: "High DW velocity in Co/Ni with perpendicular anisotropy", IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG2009), Sacramento, USA, May 5, 2009.
- Y. Ohno, Y. Kondo, M. Ono, S. Matsuzaka, H. Sanada, K. Morita, and H. Ohno:
  "Multi-pulse operation and optical detection of nuclear spin coherence in a quantum well",
  The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18), Kobe, Japan, July 19, 2009.

- E. Saitoh: "Spin Hall effects and spin Seebeck effect in metallic films", International Conference on Magnetism (ICM 2009), Karlsruhe, Germany, July 27, 2009.
- Y. Suzuki: "Spin control by application of electric current and voltage", Royal Society Scientific Discussion Meeting: The spin on electronics, London, UK, September 29, 2009.
- Y. Otani, T. Yang, Y. Fukuma & L. Wang: "Pure-spin-current induced switching and interface contribution", 11th Joint MMM-Intermag Conference, Washington DC, USA, January 21, 2010.
- T. Ono: "Modification of Spin Wave Propagation by Current Injection", American Physical Society March Meeting, Portland, USA, March 17, 2010.
- T. Fukumura: "Electrical Control of Room Temperature Ferromagnetism in Magnetic Oxide Semiconductor", International Conference on Superconductivity and Magnetism (ICSM2010), Antalya, Turkey, April 28, 2010.
- M. Tanaka: "Properties and functionalities of MnAs nanoparticles in III-V: spin transport, magnetoresistance, and electromotive force", 2010 Magnetic Nanostructures Gordon Research Conference, Maine, USA, August 12, 2010.
- E. Saitoh: "Spin current coupled with charge and heat currents", The IEEE 7th International Symposium on Metallic Multilayers (MML2010), Berkeley, USA, September 19, 2010.
- K. Takanashi: "Spin Current and Spintronics" International Conference on Electronic Materials and Nanotechnology for Green Environment (ENGE2010), Jeju Island, Korea, November 23, 2010.
- S. Ohya, I. Muneta, P.N. Hai, K. Takata, and M. Tanaka: "Valence-band structure of the ferromagnetic semiconductor GaMnAs investigated by resonant tunneling", American Physical Society March Meeting, Dallas, USA, March 23, 2011

（４）「国民との科学・技術対話」について

本特定領域の成果を社会・国民にわかりやすく説明する活動としては、2010 年度日本物理学会科学セミナー「スピントロニクス−最先端の物理と技術」がある。科学セミナーは、日本物理学会が最先端科学の紹介や科学的成果の普及を目的として、毎年一般市民向けに行っているものである。2009 年度は「環境・エネルギー問題へ発信する基礎科学」というテーマで、領域代表の高梨が「スピントロニクスと低消費電力デバイス」と題する講演を行ったところ、反響が大きかったことから、2010 年度はスピントロニクスを全体テーマとし、本特定領域が共催となり開催された。以下にその概要を記す。

名　称　：日本物理学会 科学セミナー「スピントロニクス−最先端の物理と技術」
開催時期：2010 年 8 月 19 日（木）～20 日（金）
開催場所：東京大学（本郷キャンパス）
講　師　：大谷義近（東大），新庄輝也（国際高等研），宗片比呂夫（東工大），前川禎通（原子力機構），齋藤英治（東北大），與田博明（東芝），田中雅明（東大），樽茶清悟（東大）
［下線は本特定領域の関係者］
参加者　：総数 261名
うち，学生 約30 %，教員 約30 %，研究者 約10 %，その他 約30 %.
日本物理学会の非会員が約60 %．年齢は，17~82歳まで広く分布.
アンケート結果による満足度等：

アンケート回収107名（回収率約40 %）のうち、「大いに満足」および「満足」合わせて96名、「普通」9名、「やや不満」「かなり不満」は各1名であり、これまでの日本物理学会科学セミナーにおいて、参加者総数も最高、満足度も最高の記録となった。

７． 研究組織と各研究項目の連携状況

計画研究の研究組織は以下のとおりである。（分担者は最終年度時の氏名を記す。）

総括班

代表者：高梨弘毅（東北大学・金属材料研究所・教授） 分担者：大谷義近（東京大学・物性研究所・教授）／大野裕三（東北大学・電気通信研究所・准教授）／小野輝男（京都大学・化学研究所・教授）／田中雅明（東京大学・工学系研究科・教授）／前川禎通（日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・センター長） 協力者：安藤功兒（産業技術総合研究所・エレクトロニクス研究部門・副部門長）／家泰弘（東京大学・物性研究所・所長）／大野英男（東北大学・電気通信研究所・教授）／高尾正敏（大阪大学・基礎工学研究科・特任教授）／宮崎照宣（東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授）

研究項目Ａ０１　スピン源の探索・創製

ァ．スピン源の探索と創製調整班 代表者：高梨弘毅（東北大学・金属材料研究所・教授） 分担者：白井正文（東北大学・電気通信研究所・教授）／山本眞史（北海道大学・情報科学研究科・教授）／黒田眞司（筑波大学・数理物質科学研究科・教授）／高橋有紀子（物質・材料研究機構・主任研究員）／藤森淳（東京大学・理学系研究科・教授）
イ．ナノ構造制御による高効率スピン源の探索と創製 代表者：高梨弘毅（東北大学・金属材料研究所・教授） 分担者：水口将輝（東北大学・金属材料研究所・准教授）
ウ．高効率スピン源の理論設計 代表者：白井正文（東北大学・電気通信研究所・教授）
エ．ハーフメタル系材料を用いた高効率スピン源の探索と創出 代表者：山本眞史（北海道大学・情報科学研究科・教授） 分担者：植村哲也（北海道大学・情報科学研究科・准教授）／松田健一（北海道大学・情報科学研究科・助教）
オ．強磁性半導体の特性制御とスピン源への応用 代表者：黒田眞司（筑波大学・数理物質科学研究科・教授） 分担者：金澤研（筑波大学・数理物質科学研究科・助教）
カ．高スピン偏極材料のナノ構造解析とスピン偏極率測定 研究代表者：高橋有紀子（物質・材料研究機構・主任研究員） 分担者：古林孝夫（物質・材料研究機構・主席研究員）／宝野和博（物質・材料研究機構・フェロー）／大久保忠勝（物質・材料研究機構・グループリーダー）／A. Rajanikanth（物質・材料研究機構・研究員）
キ．軟Ｘ線磁気円二色性および軟Ｘ線散乱による高スピン偏極材料のキャラクタリゼーション 代表者：藤森淳（東京大学・理学系研究科・教授） 分担者：小出常晴（高エネルギー加速器研究機構・准教授）／竹田幸治（日本原子力研究開発機構・研究員）

研究項目Ａ０２　スピン流とナノヘテロ構造

ァ．スピン流とナノヘテロ構造調整班 代表者：大谷義近（東京大学・物性研究所・教授） 分担者：新田淳作（東北大学・大学院工学研究科・教授）／秋永広幸（産業技術総合研究所・ナノテクノロジー研究部門・研究グループ長）／井上順一郎（名古屋大学・工学研究科・教授）
イ．新しいスピン流生成・操作手法の探索 代表者：大谷義近（東京大学・物性研究所・教授） 分担者：新見康洋（東京大学・物性研究所・助教）

ウ．スピン軌道相互作用を用いたスピン流の電気的な検出と制御 代表者：新田淳作（東北大学・工学研究科・教授） 分担者：好田誠（東北大学・工学研究科・助教）
エ．シリコンベース素子を用いたスピン注入効率の最適化 代表者：秋永広幸（産業技術総合研究所・ナノテクノロジー研究部門・研究グループ長） 分担者：末益崇（筑波大学・数理物質科学研究科・准教授）
オ．ナノヘテロ構造におけるスピン注入とスピン蓄積の理論 代表者：井上順一郎（名古屋大学・工学研究科・教授） 分担者：伊藤博介（関西大学・理工学部・准教授）／紺谷浩（名古屋大学・理学研究科・准教授）／大成誠一郎（名古屋大学・工学研究科・助教）

研究項目Ａ０３　スピン流と光物性

ァ．スピン流と光物性調整班 代表者：大野裕三（東北大学・電気通信研究所・准教授） 分担者：宗片比呂夫（東京工業大学・理工学研究科・教授）／安藤康夫（東北大学・工学研究科・教授）／永長直人（東京大学・工学系研究科・教授）
イ．半導体量子構造における核スピンの光制御・検出 代表者：大野裕三（東北大学・電気通信研究所・准教授）
ウ．強磁性半導体における光磁化の解明と制御 代表者：宗片比呂夫（東京工業大学・理工学研究科・教授）
エ．金属系多層膜におけるスピン流と磁気緩和の光学的検出 代表者：安藤康夫（東北大学・工学研究科・教授） 分担者：大兼幹彦（東北大学・工学研究科・准教授）／水上成美（東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・助教）／永沼博（東北大学・工学研究科・助教）
オ．光・電子スピン結合の理論 代表者：永長直人（東京大学・工学系研究科・教授）

研究項目Ａ０４　スピン流と電子物性

ァ．スピン流と電子物性調整班 代表者：小野輝男（京都大学・化学研究所・教授） 分担者：勝本信吾（東京大学・物性研究所・教授）／齊藤英治（東北大学・金属材料研究所・教授）／多々良源（首都大学東京・理工学研究科・准教授）／前川禎通（日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・センター長）
イ．スピン流による磁気構造のナノスケール制御 代表者：小野輝男（京都大学・化学研究所・教授）
ウ．単電子スピン制御 代表者：勝本信吾（東京大学・物性研究所・教授）
エ．ナノ磁性体におけるスピン流・電磁場変換 代表者：齊藤英治（東北大学・金属材料研究所・教授）
オ．逆スピンホール効果の微視的理論と応用 代表者：多々良源（首都大学東京・都市教養学部・准教授）
オ．磁壁運動によるスピン流と起電力 代表者：前川禎通（日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・センター長） 分担者：森道康（日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・副主任研究員）／高橋三郎（東北大学・金属材料研究所・助教）／家田淳一（日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究員）／大江純一

郎（日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究員）／安立裕人（日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究員）

研究項目Ａ０５　スピン流と機能・制御

ア．スピン流の機能・制御調整班 代表者：田中雅明（東京大学・工学系研究科・教授） 分担者：鈴木義茂（大阪大学・基礎工学研究科・教授）／清水大雅（東京農工大学・共生科学技術研究院・特任准教授）／仲谷栄伸（電気通信大学・情報理工学研究科・教授）
イ．スピン偏極電流制御デバイス 代表者：田中雅明（東京大学・工学系研究科・教授） 分担者：大矢忍（東京大学・工学系研究科・准教授）
ウ．スピン流高周波・熱デバイスの研究 代表者：鈴木義茂（大阪大学・基礎工学研究科・教授） 分担者：白石誠司（大阪大学・基礎工学研究科・准教授）／野崎隆行（大阪大学・基礎工学研究科・助教）
エ．光スピントロニクス機能デバイスの研究 代表者：清水大雅（東京農工大学・共生科学技術研究院・特任准教授） 分担者：中野義昭（東京大学・先端科学技術研究センター・教授）
オ．スピン偏極電流磁化反転の解明とデバイス設計 代表者：仲谷栄伸（電気通信大学・情報理工学研究科・教授）

公募研究（平成21~22年度）の研究組織は以下のとおりである。

研究項目Ａ０１　スピン源の探索・創製
・角田匡清（東北大学・工学研究科・准教授）
「窒化鉄薄膜を用いた高効率スピン源の開発」
・柳原英人（筑波大学・数理物質科学研究科・准教授）
「スピンフィルタ効果を示す強磁性絶縁障壁材料の探索」
・松下未知雄（名古屋大学・理学研究科・准教授）
「有機局在スピン–伝導電子共存系におけるスピン流の解明」
・壬生攻（名古屋工業大学・工学研究科・教授）
「原子層制御蒸着法および局所磁性測定法を用いた高スピン分極合金の探索と最適化」
・川越毅（大阪教育大学・教育学部・准教授）
「スピン偏極ＳＴＭで探る高スピン偏極磁性合金薄膜の表面状態とスピン依存伝導」
・林将光（物質・材料研究機構・主任研究員）
「強磁性細線集合群を用いた新たなスピン流生成手法の確立」

研究項目Ａ０２　スピン流とナノヘテロ構造
・加藤雄一郎（東京大学・工学系研究科・准教授）
「ナノチューブ・III-V族半導体ヘテロ構造による電流誘起スピン」
・齋藤秀和（産業技術総合研究所・エレクトロニクス研究部門・主任研究員）
「酸化ガリウム障壁層を用いた半導体へのスピン注入」

研究項目Ａ０３　スピン流と光物性
・今田真（立命館大学・理工学部・教授）
「強磁性–非磁性接合の非磁性層電子状態と伝導電子スピン状態ダイナミクスの実験的解明」

研究項目Ａ０４　スピン流と電子物性
・土井正晶（東北大学・工学研究科・准教授）

「ナノ狭窄構造薄膜のコヒーレントマイクロ波発振に関する研究」

研究項目Ａ０５　スピン流と機能・制御

・陽完治（北海道大学・量子集積エレクトロニクス研究センター・教授）
「InAs系スピントランジスタの非弾性領域での動作実証」
・福村知昭（東北大学・金属材料研究所・講師）
「強磁性酸化物半導体の高温強磁性の微視的機構」

なお、平成20年度にA01班であった陽完治は、21年度からA05班に移った。また、平成20年度に公募研究代表者であった以下の２名は、21年度からは研究代表者にはなっていない。

・石川潔（兵庫県立大学・准教授）
「気体原子のスピン流を利用したSi結晶へのスピン注入法の開発」（研究項目A01）
・長浜太郎（産業技術総合研究所・エレクトロニクス研究部門・研究員）
「MgO強磁性トンネルトランジスタの開発」（研究項目A05）

上記の計画研究および公募研究の研究グループは、各研究項目内および研究項目間で、互いに以下のような密接な連携研究を展開した。

(a) 磁性金属・合金から半導体へのスピン注入に関する研究
磁性金属・合金の成膜を行っている高梨（A01）および山本（A01）に、新田（A02）および秋永（A02）が半導体の専門家として連携し、磁性金属・合金と半導体のナノ複合構造を作製して研究を進めた。

(b) 規則合金を用いた積層構造の磁性と伝導に関する理論および実験の連携研究
高梨（A01）および山本（A01）が薄膜の作製、藤森（A01）、高橋（A01）、壬生（A01）、川越（A01）が薄膜の評価、白井（A01）、井上（A02）が理論による予言と説明という立場で連携し、研究を進めた。

(c) 磁性半導体の作製と評価に関する連携研究
黒田（A01）および田中（A05）が磁性半導体の作製を、藤森（A01）、高橋（A01）、秋永（A02）が評価を担当し、連携して研究を進めた。

(d) スピンホール効果に関する実験および理論の連携研究
高梨（A01）、大谷（A02）、齊藤（A04）が実験、井上（A02）、永長（A03）、多々良（A04）、前川（A04）が理論を担当し、連携して研究を進めた。

(e) スピン流と磁気モーメントとの相関とデバイス応用に関する実験及び理論の連携研究
小野（A04）、田中（A05）が実験、多々良（A04）、前川（A04）、仲谷（A05）が理論を担当し、連携して研究を進めた。

(f) 半導体・強磁性金属ハイブリッド光アイソレータの高機能化に関する連携研究
秋永（A02）および宗片（A03）が強磁性金属薄膜の作製と基礎的な評価、清水（A05）がデバイス応用を担当し、連携して研究を進めた。

８． 研究費の使用状況

本特定領域では、薄膜作製装置や微細加工装置などの大型設備は現有のものを出来る限り有効活用し、これらに新たな機器を追加、拡充することによって、高機能化・多機能化・効率化を図るという方針で研究を進めた。領域設定時（平成19年度）から最終年度（平成22年度）までの研究費の各班の配分額（単位：千円）と使用状況を、以下に記す。

	平成19年度	平成20年度	平成21年度	平成22年度
総括班	4,800	8,700	8,700	11,600
研究項目A01	54,300	66,900	66,500	52,200
研究項目A02	32,500	41,700	41,700	31,500
研究項目A03	28,600	45,900	42,100	33,600
研究項目A04	35,400	45,600	45,200	35,700
研究項目A05	31,600	41,000	40,500	32,900
公募研究	0	24,000	24,900	23,100

総括班：総括班経費の主な使途は、成果報告会概要集、英文成果報告書、ニュースレターなどの印刷費、総括班会議や成果報告会などの会議費、研究動向調査などの旅費、研究・事務補助に関わる謝金、事務処理効率化のためのＯＡ部品などである。さらに、若手研究者（学生、ポスドク、助教クラス）の交流と育成のため、「若手の会」を開催し、その旅費にも活用した。

調整班：調整班経費の主な使途は、各研究項目内での情報交換と共同研究の促進のために開催される班会議や打ち合わせ会などの会議費・旅費や、研究動向調査のための旅費である。また、電子メールやビデオ会議を通じて議論するためのＯＡ部品の購入にも充当した。

研究項目Ａ０１：既存の薄膜作製装置をさらに高機能化・多機能化するための排気設備や真空チャンバ、EBガン、スパッタカソード、基板加熱機構などの付属部品、薄膜の基本的な評価に必要不可欠な測定機器・部品（温度コントロールシステム、プローバ、磁化測定装置や種々の測定用関連部品）を購入し、スピン源の探索・創製が効率的かつ迅速に行えるように整備した。

研究項目Ａ０２：上記Ａ０１班と基本的には同様で、薄膜の作製や基本的な評価に必要な機器・部品を購入した。また、特に界面制御という観点から、表面評価用に走査型プローブ顕微鏡を購入した。

研究項目Ａ０３：光学測定用の機器および関連部品（レーザー、ポジショニングシステム、温度コントロールシステム、光学定盤など）を購入し、スピンダイナミックス測定用の光学システムを構築・改良した。また、基本的な薄膜作製のための部品や素子構造作製のための微細加工関連部品も購入した。

研究項目Ａ０４：素子構造作製のための微細加工関連部品や電気的測定に必要な機器（ナノボルトメータ、エレクトロメータ、ロックインアンプなど）を購入した。

研究項目Ａ０５：素子構造作製の基礎となる薄膜作製および微細加工関連部品や、素子評価に必要な光学的および電気的測定機器および関連部品を購入した。

９．　当該学問分野及び関連学問分野への貢献度

本特定領域では、スピン流に関する基礎現象や材料開発に関して、以下のような優れた成果が得られた。

・ 室温における巨大スピンホール効果の発見
・ 熱からスピン流を生成するスピンゼーベック効果の発見
・ 磁性絶縁体中のスピン波スピン流の実証と制御
・ ファラデーの法則の一般化として予言されたスピン起電力の実証
・ 純粋スピン流による磁化制御
・ 光による磁化制御とスピン流生成
・ ハーフメタル・ホイスラー合金の作製・プロセス技術の改善による TMR および CPP-GMR の増大
・ 高効率のスピン偏極電子注入を可能にする磁性金属／半導体接合の作製
・ 酸化物半導体 Co ドープ TiO_2 における室温強磁性と磁化の電界制御の実現

スピン流は、スピントロニクスの基礎となる重要な概念であり、上記の成果はスピントロニクスの研究および応用分野の格段の発展をもたらすもので、その貢献度はきわめて大きい。

また、デバイス応用に直接つながる成果として、

・ 強磁性トンネル接合を用いた、半導体素子と同程度あるいはそれ以上の検波感度を有するスピントルクダイオードの開発
・ 反強磁性結合積層膜を用いた、スピントルクによる 20 GHz を超える高周波発振の実現
・ 強磁性金属を用いた半導体光アイソレータの作製と高性能化、および一方向発振リングレーザーの実現

なども得られた。これらは、スピントロニクスデバイスの実現に寄与する。
2009 年 6 月に刊行された「スピントロニクスの基礎と材料・応用技術の最前線」（シーエムシー出版、監修：高梨弘毅）では、全３４章のうち２６章が本特定領域の関係者により執筆されており、本特定領域が基礎から応用までスピントロニクス全般に大きく貢献したことを示している。

本特定領域においては、スピンゼーベック効果の発見に代表されるように、これまで全く未開拓だった熱とスピン流に関する研究が勃興し、「スピンカロリトロニクス」と呼ばれる新しい研究分野が作られた。「スピンカロリトロニクス」は、熱電変換などのエネルギー関連分野の研究者からも大きな注目を集めており、本特定領域が単に既存のスピントロニクス分野の枠に留まらず、他の研究分野にも大きな波及効果を与えたことがわかる。

さらに、本特定領域の設定以降、関係各学会で「スピン流」を主要課題としたシンポジウムや研究会が数多く開催されるようになった。例えば、

2009 年 9 月 9 日	応用物理学会シンポジウム「スピン流が生み出す新しい物性」（富山大学）
2009 年 9 月 26 日	日本物理学会シンポジウム「スピン流に関わる新現象」（熊本大学）
2009 年 11 月 2 日	日本磁気学会研究会「スピン流とデバイス応用」（東北大学）
2010 年 3 月 29~30 日	日本金属学会シンポジウム「スピン流の創出と制御のための材料創製と評価」（筑波大学）
2010 年 9 月 5 日	日本磁気学会研究会 ”Recent Progress in Spin Current Research”（筑波大学）

などである。この数年の間に「スピン流」の重要性が国内外で広く認知されてきており、本特定領域の貢献度はきわめて大きい。

１０． 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況

本特定領域に参画した若手研究者は、学生 304 名、ポスドク等非常勤職員 25 名、助教等常勤職員 32 名（研究代表者は除く）である。

学生 304 名のうち、167 名が既に就職した。就職先としては、133 名が企業、34 名が大学等の研究機関（ポスドクあるいは常勤職員）であり、多くの学生が本特定領域の期間中に研究者として巣立った。在学中に、国際会議の招待講演を行った事例もある。例えば、小林正起氏（東大・藤森グループ・博士課程学生；ICPS 2008, Rio de Janeiro, Brazil, 2008 年 7 月）や石川貴之氏（北大・山本グループ・博士課程学生；MMM2008, Austin, USA, 2008 年 11 月）などである。

ポスドク等非常勤職員25名のうち、大学等の研究機関に常勤職員として就職した者は11名、企業に就職した者は 3 名となっている。助教等常勤職員 32 名のうち、准教授等に昇進した者は 10 名で、本特定領域の期間中に昇進した若手研究者も多いことがわかる。代表的な事例としては、木村崇氏（領域設定当時、東大・大谷グループ助教）は、スピン流に関する一連の研究成果が評価され、2009 年に 34 歳の若さで教授として九州大学に赴任した。

本特定領域の関係者の受賞件数は全体で 49 件であるが（17 ページ参照）、そのうち 20 件は学生、ポスドク、助教等の若手研究者の受賞であり、若手研究者の活躍を見ることができる。代表的な事例として、内田健一氏（東北大・齊藤グループ・博士課程学生）は、「スピン流−熱流変換現象の基礎物理及び応用技術の開拓」で第 1 回日本学術振興会育志賞（2010 年度）を受賞したことが挙げられる。育志賞は、天皇陛下御即位 20 年に当たり陛下からの御下賜金によって創設されたもので、優秀な博士課程学生に贈られる。理工系で 5 名が選ばれたが、内田氏は物性物理・材料科学分野で、学生として日本で最高の栄誉に輝いたということができる。また、前記の木村崇氏は、”Study of spin transport in lateral metallic spin valves, and the observation of the pure spin-current induced magnetization reversal and the reversible spin Hall effect”により、国際純粋・応用物理連合若手研究者賞を 2009 年に受賞した。さらに、村上修一氏（領域設定当時、東大・永長グループ助教、後に東工大准教授に栄転）は、スピンホール効果の理論的研究により、第 12 回サー・マーティン・ウッド賞（物性科学分野で 40 歳以下の若手研究者が対象）を 2010 年に受賞した。

本特定領域の研究代表者の中にも、若手研究者と呼べる者は多い（領域設定時に 45 歳未満の研究代表者は 9 名）。彼らは、領域設定期間中に、研究者として大きく成長した。A04 班班長・計画研究代表者の小野輝男氏（京大）は、スピン流による磁化制御に関する研究により、2008 年第 10 回サー・マーティン・ウッド賞および第 22 回 IBM 科学賞（45 歳以下の若手研究者が対象）を受賞した。A04 班計画研究代表者の齊藤英治氏は、領域設定期間中の 2009 年に 37 歳の若さで、慶大講師から東北大教授に栄転した。同氏は、スピンゼーベック効果の発見や絶縁体中のスピン波スピン流の実証など、スピン流の生成、検出、制御に関わる多くの画期的な成果により、2008 年第 10 回サー・マーティン・ウッド賞、2009 年国際純粋・応用物理連合若手研究者賞、2011 年第 7 回日本学士院学術奨励賞（45 歳未満の若手研究者が対象）など、若手研究者に与えられる権威ある賞を総なめしている。A05 班計画研究代表者の清水大雅氏は、本特定領域設定とほぼ同時期に東大助手から東京農工大特任准教授に栄転し、さらに光スピントロニクスデバイスの研究が認められ、2011 年よりテニュア付きの准教授に昇進した。A05 班公募研究代表者の福村知昭氏は、2010 年に東北大講師から東大准教授に栄転した。同氏は、磁性酸化物半導体の研究により、2009 年文部科学大臣表彰若手科学者賞、2011 年第 7 回日本学術振興会賞を受賞した。

本特定領域の関係者で、2010 年度から開始された内閣府最先端・次世代研究開発支援プログラムに採択された研究者も少なくない。前記の小野輝男氏、福村知昭氏に加え、A02 班公募研究代表者の齋藤秀和氏（産総研）および A04 班齊藤グループ助教の安藤和也氏（東北大）である。安藤和也氏は最年少の採択者として注目された。

以上のように、本特定領域により、若手研究者の育成も十分なされたと考えている。

１１．総括班評価者による評価の状況

総括班研究協力者として評価・助言をくださった先生は、以下の５名である。
安藤功兒（産業技術総合研究所・エレクトロニクス研究部門・副部門長）
家泰弘（東京大学・物性研究所・所長）
大野英男（東北大学・電気通信研究所・教授）
高尾正敏（大阪大学・基礎工学研究科・特任教授）
宮崎照宣（東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授）

研究会／成果報告会に合わせて毎年２回の総括班会議を開催し、上記の先生方に研究の進捗状況を説明し、領域運営や研究推進について助言をいただいた。

全体的には、「金属と半導体の研究がバランス良く進捗し、スピン流の物理という観点で世界をリードする新しい成果が得られており、この分野の今後のさらなる発展を期待したい」という評価意見をいただいている。

個別的な内容で、これまでいただいた助言とそれに対する対応状況を、以下にまとめる。

- 若手の育成を促す意味で、若手の会のようなもの組織し、総括班や調整班で積極的に支援するといい。
  →このことは実際に平成 19 年度内に実行に移し、以後毎年 1 回、若手研究交流会を行った。
- 英文の成果報告書を出すのは大変に良いことである。国際的な広報活動を行うことは、海外の研究者にとっても役に立つ。成果報告書は単なる論文の別刷り集ではなく、研究トピックスをわかりやすく解説したものがよい。
  →この意見は、毎年の英文成果報告書：Research Highlights の刊行に反映された。
- 成果報告会の際に、何人か海外の研究者を招へいし、講演をしてもらうと、さらに活気が出て良い。
  →このご意見を受け、平成 21 年 8 月の研究会では、デルフト工科大学の G. Bauer 先生を招待し、ご講演いただいた。さらに、平成 22 年 1 月の成果報告会では、ノーベル物理学賞受賞者の P. Grünberg 先生を招待し、特別講演会を催した。
- 研究会／成果報告会では民間企業にとっても有用な発表が多いが、民間企業からの参加者が少ないのは残念なことである。宣伝が足りないのではないか。
  →この意見に従い、民間企業の関連研究者に対するアナウンスを強化するように努めた。また、東京で開催する方が民間企業の方は参加しやすいという配慮から、冬の成果報告会は東京大学で行った。
- 研究会／成果報告会で若手研究者の発表が多いのは大変良い。
  →研究会／成果報告会では常にポスターセッションを設け、学生を含む若手研究者に積極的に発表してもらい、研究者間のコミュニケーションを深めた。また、冬の成果報告会は原則として研究代表者がその年度のグループの成果をまとめて発表することとしたが、夏の研究会では研究代表者に限らず、若手研究者にホットなトピックスや研究の進捗状況を発表してもらう場とした。
- 公募研究者との連携にも十分注意を払って欲しい。
  →領域代表および各研究項目の班長は随時連携状況をモニターし、注意を怠らないようにした。実際に、計画研究者と公募研究者との連携は進み、特に公募研究者が多い A01 班では材料創製とその評価という形で連携が組まれ、多くの成果が得られた。
- 成果が出ている一方で、それだけ内容が高度で難解になっているので、もう少しチュートリアルな配慮があると良い。
  →研究会／成果報告会では内容が専門的になり、チュートリアルな配慮は難しかったが、例えば日本物理学会科学セミナー（本資料 26 ページ参照）では、一般の聴講者から高い評価を得ることができ、チュートリアルな観点でも成果を残せたと考えている。