

平成 2 1 年 6 月 4 日現在

研究種目： 特定領域研究

研究期間： 2004 ~ 2008

課題番号： 16076206

研究課題名(和文) 超構造における異常磁気伝導現象の発現

研究課題名(英文) Emergence of Anomalous Magnetotransport Phenomena in Superstructures

研究代表者

家 泰弘 (IYE YASUHIRO)

東京大学・物性研究所・教授

研究者番号：30125984

研究成果の概要：

人工構造物質における異常磁気伝導現象を探究し、金属磁性細線における磁壁の電流駆動、半導体 2 次元電子系の超構造における異常磁気伝導現象、量子ホール系におけるスピン依存伝導、擬 2 次元系層状物質における角度依存磁気抵抗効果などに関して新たな知見を得た。また、伝導電子系にスピン軌道相互作用やスピン反転散乱が働く場合のスピン緩和などスピントロニクスにおける根本的問題に関する理論を構築した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	13,200,000	0	13,200,000
2005年度	13,200,000	0	13,200,000
2006年度	32,700,000	0	32,700,000
2007年度	13,200,000	0	13,200,000
2008年度	13,200,000	0	13,200,000
総計	85,500,000	0	85,500,000

研究分野： 量子輸送，低温物理

科研費の分科・細目： 物性（光物性・半導体・誘電体）(実験) 4304

キーワード： 磁気抵抗，スピン依存伝導，スピントルク，磁壁，整合振動，半導体 2 次元電子系，強磁性細線，メソスコピック超伝導

## 1. 研究開始当初の背景

本研究グループは半導体や金属の人工構造における異常磁気伝導をテーマとする研究を遂行した。本研究テーマに関連する、研究チームメンバーのそれまでの研究経過・研究成果を以下に列挙する。

[家] 半導体 2 次元電子系や強磁性体との複合構造における量子輸送 2 次元電子系に周期変調磁場を印加した系において、ベクトル

ポテンシャル変調による磁気抵抗整合振動効果を初めて見出した。また複合フェルミオン領域における整合振動の観測から複合フェルミオンのスピン偏極に関する知見を得た。人工周期系におけるウムクラップ電子散乱の効果を実験的に評価した。アンチドット格子における量子干渉効果(AAS 振動および AB 振動)を観測し、単一リングの場合との比較を行った。超伝導ネットワークにメソスコピック磁性体を付加した系でチェッカー

ボードパターンの外部磁場下のリトル・パークス振動を観測し、ホフスタッター・パタフライ・ダイヤグラムとの関連を議論した。

[長田] 2次元伝導層が積層した構造を持つ層状伝導体の層間磁気抵抗については、1990年の本研究代表者(家)を含むグループによる角度依存磁気抵抗振動(AMRO)の発見以来、種々の物質系で各種の磁気抵抗角度効果が見出されてきた。これらはFermi面上の電子軌道効果として半古典的に説明され、フェルミオロジー研究の手段の一つとして広く利用されている。1998年にMcKenzieらは層間結合が弱く電子軌道運動が定義できないインコヒーレント系の角度効果に関する問題を提起し、局所的トンネル現象とする解釈を与えた。これに触発され、2003年に本分担者(長田)は層間伝導度を層間結合で振動展開することにより、層間コヒーレンスをパラメータとして半古典的軌道効果と局所トンネル機構を連続的に結ぶトンネル描像を構築した。

[小野] 金属強磁性体薄膜・多層膜およびそれらを微細構造化した系における磁性と磁気伝導現象の研究を行ってきた。巨大磁気抵抗効果を利用してサブミクロン幅の磁性細線の磁化反転過程を実時間で捉えた実験、単一磁壁による伝導電子の散乱の究明、強磁性ナノワイヤーにおける量子化コンダクタンスの究明、ナノコンストラクションにおける磁壁の生成、微小強磁性円板アレイの磁化を磁気力顕微鏡観察、スピントランスファー効果による磁壁の移動等の実験研究において成果を挙げてきた。

[多々良] 現在のIT社会は半導体電子回路と小さな磁石への情報記録を組み合わせた情報機器から成り立っているが、従来の古典的メカニズムではこれ以上の高密度化には限界があるとされている。そこで注目されているのが全く新しい原理、電流誘起磁化反転である。磁壁による電気抵抗の理論を構築し、磁壁の導入による量子干渉効果の破壊によって伝導度が上がる場合があることを明らかにした。電流による磁化反転の一例として、電流による磁壁の駆動についてミクロな立場からの理論を構築した。磁壁駆動のメカニズムが、金属細線の場合とナノ接合や磁性半導体の場合とでは全く異なり、その結果として駆動のための臨界電流値も両者で大きく異なることが解明された。臨界電流を小さくするには反磁場効果を減らせばよいことを見出し、微小電流で書き込み可能な磁気メモリの実現に重要な示唆となる結果を得た。

## 2. 研究の目的

磁気伝導現象はさまざまな物質において多彩な様相を示す。電流磁気効果(磁気抵抗およびホール効果)、磁気量子振動現象、電子局在に関わる負磁気抵抗や抵抗ゆらぎなど、その物理が解明されて系の電子状態および電子散乱過程に関する基本的情報を得る手段として広く利用されてきた。近年、有機伝導体や酸化物伝導体など新奇物質の出現、ならびに人工超格子や微細構造など人工構造物質作製の発達に伴って、新しい磁気量子輸送現象が数多く見出され、磁気伝導現象の研究が新たな局面を迎えている。その一方、例えば強磁性物質における磁壁による電子散乱や異常ホール効果など、古くから良く知られている現象でありながらその扱いが現象論に留まりミクロな定式化が課題として残されている問題もある。このような状況を踏まえて、本研究では本特定領域の中でも特に人工物質・超構造における新奇な磁気伝導現象を追求するとともに、人工構造系の特徴である制御性を生かした実験およびミクロ立場からの定式化による理論の構築を通じて磁気伝導現象の本質解明を目指す。

本研究チームは以下の研究テーマに関して協力して実験および理論的研究を行う。本研究チームの特色の一つは、従来主として半導体系や分子性導体を扱ってきた研究者と金属磁性体を扱ってきた研究者とが協力関係を結んで研究を遂行するにあり、互いの得意とする分野の知識および技術的ノウハウの共有により研究の新展開を計るものである。

### [家] 半導体超構造、半導体/磁性体複合構造における磁気伝導現象の研究

微小ホールバー上にメゾスコピック磁性体を配した系の磁気伝導を調べ、微小磁性体の磁化挙動と関連した空間変化磁場中の伝導現象を明らかにし、磁気伝導デバイスの可能性を探る。希薄磁性半導体における異常ホール効果等の磁気伝導現象を究明する。二層量子ホール状態における量子伝導現象を追求する。アンチドット格子におけるAB効果を単一リングのそれと比較して、デコヒーレンス機構を解明する。

### [長田] 半導体超構造・分子性導体の強磁場磁気伝導現象の研究

周期的変調構造が導入された電子系(Bloch電子系)が、外部磁場の方位・強度と空間構造との整合性を反映して示す新しい磁気伝導現象の探索と機構解明を行う。(1)半導体超格子や低次元有機導体を対象として磁場方位依存磁気抵抗効果に対する電場効果や量子効果、ロックイン電流、軌道力オスとの関連を探求する。(2)半導体超構造

や低次元導体を対象に, Harper ブロードニングや Hofstadter 準位を反映した超強磁場下 Bloch 電子系特有の伝導現象の実験的探索を行う.

#### [小野] 磁性金属多層膜・メゾスコピック磁性体超構造における磁気伝導現象

磁性金属多層膜・メゾスコピック磁性体超構造における磁気伝導現象を研究する. 特に, 「磁壁の電流駆動」と「スピン注入磁化反転」を研究することで, これらの現象に共通な物理である伝導電子から磁気モーメントへの「スピントランスファー効果」の物理的知見を深めることを目指す.

#### [多々良] 磁性ならびにスピン自由度の関係する量子伝導現象の理論的説明

光や電流による磁化反転現象を理論的に定式化して解析する. 従来の理論解析は現象論に基づいて不確定要素を多く含むようなものであったのに対し, 本研究ではミクロな立場から適用範囲の広い定式化を行い, 一般性のある解析が行える理論の構築を目指す. また, 応用の観点からどのような物質・構造が適しているのかなどに関する知見を得る.

### 3. 研究の方法

[家] GaAs/AlGaAs 高移動度 2 次元電子系試料をベースとして, 微細加工を施すことにより, アンチドット系や微小ホール素子などの人工構造を作製し, 希釈冷凍機温度および強磁場下での測定を行う.

[長田] 本研究の進め方は以下のとおりである. トンネル描像検証用の半導体多層系試料の設計と分子線エピタキシー法による作製, および層状有機導体結晶の電解成長を行う. 試料 2 軸回転機構付き超伝導磁石を用いて層間磁気抵抗の磁場方位依存性の精密測定を行う. 実験結果をトンネル描像により解釈・解明する.

[小野] それまでに進めてきた金属強磁性体薄膜・多層膜およびそれらの微細構造試料における磁性と磁気伝導現象の実験をさらに発展させる. 特に, 磁壁の電流駆動とスピン注入磁化反転の試料形状・物質依存性を調べる. さらに, 従来の多結晶試料に留まっていた微細構造系の実験を単結晶試料に拡張すべく, 単結晶磁性体薄膜・多層膜の作製とその微細加工技術を確立し結晶方位依存性等の研究を推進する.

[多々良] 電流駆動磁壁電流誘起磁化反転の基礎過程を理論的に理解し, その効率の評価

を行う. スピン軌道相互作用やスピン反転散乱の効果をミクロに取り入れた定式化を行う.

### 4. 研究成果

[家] 短周期平面超格子におけるバンド折りたたみとフェルミ面再構成によって生ずるオープン軌道と, 超周期構造との幾何学共鳴による磁気抵抗振動効果を発見し, その詳しい解析を行なうとともに, 従来から知られていたサイクロトロン運動に伴う整合振動効果との関係を明らかにした. 準周期性をもつ 1 次元フィボナッチ超格子における整合振動を観測し, その振幅とポテンシャル変調との関係を定量的に明らかにした.

2 次元正孔系の高次ランダウ準位において顕著な磁気伝導度異方性を観測し, 電子系の場合と類似のストライプ相の証拠を見出した.

アンチドット格子系および単一アンチドット系におけるアハロノフ・ボーム(AB)振動を詳細に調べた.  $\nu=2$  量子ホール状態の両側でふるまいが大きく異なることを見出し, これをスピン選択トンネリング過程に基づいて解釈した. AB 振動パターンの磁場およびゲート電圧温度依存性から, アンチドット周りのエッジ状態の self-consistent potential 勾配を求め, エッジ状態の screening の温度依存性を定量的に示した.

超伝導ネットワークに空間変調磁場を付加した系の超伝導転移領域の  $I-V$  特性を詳細に測定した. fully frustrated XY モデルとの比較を行い, 超伝導転移がキंक対の解離による擬似 KTB 転移であることを示した.

多プローブ微小ホール素子を用いたメゾスコピック超伝導体の磁束状態の空間分解測定を行った.

[長田] 半導体多層系を用いた磁気抵抗角度効果の起源と層間コヒーレンスとの関係の解明: 人工的に層間結合, 散乱頻度, 層数などのパラメータが設計・制御可能な擬 2 次元多層系である GaAs/AlGaAs 半導体超薄膜構造を用いて磁場中層間伝導の実験を行った. 実験した構造は, 多層系(超格子), 5 層系, 2 層系, 単層系であり, 各々について層間コヒーレンスの異なる試料を用意し, 角度依存磁気抵抗振動(AMRO), 平行磁場でのピーク効果, 磁気抵抗の大局的角度依存性(バックグラウンド)という 3 つの角度効果に着目して調べた. その結果, AMRO は 2 層系から多層系までの試料で層間コヒーレンスに関係なく観測された. これは AMRO の真の起源が Fermi 面上の電子軌道運動にあるのではなく, 局所的な隣接 2 層間の電子のトンネル現象にあることの実験的証拠である. ピーク

効果はコヒーレントな層間結合を持つ多層系でのみ観測されたが、これはピーク効果が軌道効果に由来することを示している。さらにインコヒーレントな層間結合を持つ系で観測されるバックグラウンド反転は、層間トンネル過程を持たない単層系でも観測されるため、伝導層内の電子拡散過程に起因する局所効果であることが示唆される。以上の実験的結論は量子トンネル描像の結論とよく整合し、トンネル描像の正当性を裏付けるものになっていると言える。

磁気貫通系の磁気抵抗角度効果と  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>KHg(SCN)<sub>4</sub> の電荷密度波相：表題物質の低温での電荷密度波(CDW)相は擬1次元系的な磁気抵抗角度効果(Lebed共鳴)を示すことが知られていたが、その起源については複数の提案があった。特に2003年に真木らは、系のCDWが従来型ではなくギャップレスの非従来型CDW(UCDW)であるとする仮説を提唱し、その準粒子のLandau量子化によってLebed共鳴的な角度効果が現れると主張した。これを検証する目的で、温度(CDWギャップ)をパラメータとして  $\alpha$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>KHg(SCN)<sub>4</sub> の層間磁気抵抗の全磁場方位依存性のイメージを測定した。その結果、温度がCDW転移温度に近づくにつれ低温のLebed共鳴に替わり柱状Fermi面のAMROが成長してくることを見出した。この結果は、CDW相内でLebed共鳴を与える再構成軌道を運動していたキャリアが、転移温度直下でCDWギャップを磁気貫通してAMROを示す柱状Fermi面周回軌道を運動するようになったと解釈できる。これは従来のCDWによるFermi面再構成モデルを支持し、非従来型CDWモデルを否定する結果である。さらにトンネル描像で考察した結果、Fermi面の再構成は必ずしも本質的ではなく、CDW周期ポテンシャルが存在しさえすればLebed共鳴が発現し得ることも結論された。

[小野] 電流による磁壁移動に対するジュール熱の効果を調べた結果、磁壁移動が起こる電流密度では試料温度がキュリー点近くまで上昇していることがわかった。磁性細線中に付与したくびれからの磁壁の脱離磁場の温度依存性を測定することでくびれのピンングポテンシャルの大きさを評価した。非対称構造を有する磁性細線中では磁壁の動き易さに方向性のあることを見出した。この磁壁ラチェット効果は電流誘起磁壁移動においても発現することを確認した。磁性ドット中に現れる磁気渦状態を交流電流で共鳴励起することにより磁気コアの回転運動を誘起できることをシミュレーションによって見出し、磁性ドットの電気抵抗の交流電流周波数依存性測定を行うことで、この磁気コアの共鳴励起現象を実験的に捉え

る事に成功した。励起電流を大きくすると磁気コアの向きを反転させることが可能であることを磁気力顕微鏡による直接観察によって示した。さらに、磁気渦中心に現れる磁気コアの向きをパルス電流で反転させることが可能であることを磁気力顕微鏡による直接観察によって示した。

[多々良] 微視的解析により、磁石に電流を流すことでどのようなトルクが磁化(スピン)に働くのかを明らかにすることができ、電流による磁化変転の効率化に向けた指針を得ることができた。重要な成果の一つは以下のスピン緩和の効果である。

伝導電子にスピン反転散乱やスピン軌道相互作用などのスピン緩和機構がはたらいている場合、伝導電子と磁化の間のスピン移行が影響を受ける。これまでこの際には磁化に対する摩擦項(項: Gilbert damping)と、スピン移行トルクとは直交した方向にはたらく新たなトルク項(項)が生じることが現象論的議論により指摘されていた。こうした項の大きさは磁壁駆動の効率を決める重要なファクターであるが、これらの現象論的議論ではその定量的評価はできなかった。理論によっては  $\tau = \tau_0 \frac{1}{1 + \alpha^2}$  を予言するものもいくつかあり、実際にそれらの値がどうなのかは最近の大きな問題であった。我々は、微視的モデルから、スピン緩和機構のもとでのトルクの評価を厳格に行い、 $\tau = \tau_0 \frac{1}{1 + \alpha^2}$  がたしかに生じ、それらの値は独立であることを初めて示した。これによりスピン緩和まで含めた曖昧性のない理論記述が可能となり、同時に磁壁駆動の効率をあげるための指標が与えられた。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 78件)すべて査読有

1. Temperature Dependent Screening of the Edge State around Antidots in the Quantum Hall Regime: M.Kato, A.Endo, S. Katsumoto, and Y. Iye, Phys. Rev. Lett. **102** (2009) 086802-1-4.
2. Aharonov-Bohm-type oscillations in antidot lattices in the quantum Hall regime: M.Kato, A.Endo, S.Katsumoto, and Y. Iye, Phys. Rev. **B77** (2008) 155318-1-7.
3. The Effect of Oscillating Fermi Energy on the Line Shape of the Shubnikov-de Haas Oscillation in a Two-Dimensional Electron Gas: A.Endo and Y. Iye, J. Phys. Soc. Jpn. **77** (2008) 064713-1-7.
4. Modulation of the Shubnikov-de Haas Oscillation in Unidirectional Lateral Superlattices: A.Endo and Y. Iye, J. Phys.

Soc. Jpn., **77** (2008) 054709-1-9.

5. Negative Interlayer Magnetoresistance and Zero-Mode Landau Level in Multilayer Dirac Electron Systems: T.Osada, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 084711 (2008).
6. Probing the Spin Polarization of Current by Soft X-Ray Imaging of Current-Induced Magnetic Vortex Dynamics: S.Kasai, P.Fischer, M.-Y.Im, K.Yamada, Y.Nakatani, K.Kobayashi, H.Kohno, T.Ono, Phys. Rev. Lett. **101**, 237203 (2008).
7. Switching magnetic vortex core by a single nanosecond current pulse: K.Yamada, S.Kasai, Y.Nakatani, K.Kobayashi, and T.Ono, Appl. Phys. Lett. **93**, (2008) 152502.
8. Microscopic Approach to Current-induced Domain Wall Dynamics: G.Tatara, H.Kohno and J.Shibata, Phys. Rep., **468**, 213-301 (2008).
9. Theory of Domain Wall Dynamics under Current: G.Tatara, H.Kohno and J.Shibata, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 031003 (2008)
10. Anisotropic Transport of Two-Dimensional Hole System in Higher Landau Levels: Effect of In-Plane Magnetic Field: H.Takado, Y.Hashimoto, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye, J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 074712-1-5.
11. Observation of Spin-Orbit Berry's Phase in Magnetoresistance of a Two-Dimensional Hole Anti-dot System: N.Kang, E.Abe, Y. Hashimoto, Y.Iye, and S. Katsumoto, J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 083704-1-4.
12. Phase Transitions of Superconducting Wire Network under Spatially Modulated Magnetic Field: H.Sano, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye, J. Phys. Soc. Jpn. **76** (2007) 094707-1-7.
13. Interlayer Magnetoresistance of Quasi-One-Dimensional Layered Organic Conductors: W.Kang, T.Osada, Y.J.Jo, and H.Kang, Phys. Rev. Lett. **99**, 017002 (2007).
14. Interlayer Surface Transport in Multilayer Quantum Hall Systems under Tilted Magnetic Fields: S.Okui, E.Ohmichi, and T.Osada, Int. J. of Mod. Phys. **B21**, 1524-1528 (2007).
15. Electrical switching of the vortex core in a magnetic disk: K.Yamada, S.Kasai, Y.Nakatani, K.Kobayashi, H.Kohno, A.Thiaville, T.Ono, Nature Materials, **6**,

(2007) 269.

16. Rectification of radio frequency current in ferromagnetic nanowire: A.Yamaguchi, H.Miyajima, T.Ono, Y.Suzuki, S.Yuasa, A.Tulapurkar, Y.Nakatani, Appl. Phys. Lett., **90**, (2007) 182507.
17. Self-homodyne rf demodulator using a ferromagnetic nanowire: A.Yamaguchi, H.Miyajima, S.Kasai, T.Ono, Appl. Phys. Lett., **90**, (2007) 212505.
18. Charge current driven by spin dynamics in disordered Rashba spin-orbit system: J.Ohe, A.Takeuchi and G.Tatara, Phys. Rev. Lett. **99**, 266603-1-4 (2007).
19. Magnetotransport and Magnetic-Field-Induced Density Waves in Low-Dimensional Layered Conductors: T.Osada and E.Ohmichi, J. Phys. Soc. Jpn. **75**, 051006 (2006).
20. Electric-Field Effect on the Angle-Dependent Magnetotransport Properties of Quasi-One-Dimensional Conductors: K.Kobayashi, M. Saito, E.Ohmichi, and T.Osada, Phys. Rev. Lett. **96**, 126601 (2006).
21. Dispersive Lineshape of the Resistively Detected NMR in the Vicinity of Landau Level Filling  $\nu=1$ : K.Kodera, H. Takado, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye, phys. stat. sol. (c) **3** (2006) 4380-4383.
22. Current-driven resonant excitation of magnetic vortex: S.Kasai, Y.Nakatani, K.Kobayashi, H.Kohno, T.Ono, Phys. Rev. Lett., **97**, (2006) 107204.
23. Microscopic Calculation of Spin Torques in Disordered Ferromagnets: H.Kohno, G.Tatara, J. Shibata, J. Phys. Soc. Jpn., **75**, 113706-1-4 (2006).
24. Dependence of Modulation Amplitude on Electron Density in Unidirectional Superlattice: The Effect of Thickness of the Two-Dimensional Electron Gas: A.Endo and Y.Iye, J. Phys. Soc. Jpn., **74** (2005) 1792-1799.
25. Harmonic Content of Strain-induced Potential Modulation in Unidirectional Lateral Superlattices: A.Endo and Y.Iye, J. Phys. Soc. Jpn. **74** (2005) 2794-2805.
26. Origin of Positive Magnetoresistance in Small-Amplitude Unidirectional Lateral Superlattices: A.Endo and Y.Iye, Phys. Rev. **B72** (2005) 235303-1-11.
27. Effect of Joule heating in current-driven domain wall motion: A.Yamaguchi, S. Nasu, H. Tanigawa, T.Ono, K.Miyake, K.Mibu, and T.Shinjo, Appl. Phys.

Lett. 86, (2005) 012511.

28. Propagation of a magnetic domain wall in magnetic wires with asymmetric notches: A. Himeno, T. Okuno, S. Kasai, T. Ono, S. Nasu, K. Mibu, T. Shinjo, J. Appl. Phys., **97** (2005) 066101.

29. Current driven domain wall motion in magnetic wires with asymmetric notches: A. Himeno, S. Kasai, and T. Ono, Appl. Phys. Lett. **87** (2005) 243108.

30. Effect of Spin Current on Uniform Ferromagnetism: Domain Nucleation: J. Shibata, G. Tatara and H. Kohno, Phys. Rev. Lett. **94**, 076601-1-4 (2005).

[学会発表](計 156件)

1. "Unconventional Angle-Dependent Magnetotransport and Possibility of Unconventional Charge Density Wave in  $(\text{BEDT-TTF})_2\text{KHg}(\text{SCN})_4$ ", T. Osada, R. Yamaguchi, T. Konoike, and K. Uchida, 7th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors, and Ferromagnets (ISCOM2007), 9/24-29, 2007, Peniscola, Spain.

2. "Evolution of  $h/2e$  Aharonov-Bohm oscillation with the Zeeman energy around an antidot": Masanori Kato, Akira Endo, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye, The 17th Int. Conf. on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-17) Genova, 15-20 July 2007.

3. "Observation of spin-orbit Berry phase in magnetoresistance of a two-dimensional hole antidot system": Ning Kang, Kazuya Suzuki, Eisuke Abe, Yoshiaki Hashimoto, Yasuhiro Iye, Shingo Katsumoto, The 17th Int. Conf. on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-17) Genova, 15-20 July 2007.

4. "Successive Phase Transitions in Charge Density Wave State under High Magnetic Fields", T. Osada, K. Kajiki, and E. Ohmichi, 6th International Symposium on Crystalline Organic Metals, Superconductors, and Ferromagnets (ISCOM2005), 9/11-16, 2005, Key West, USA.

[図書](計 4件)

1. 「超伝導」家泰弘(朝倉書店, 2005)

2. 「誌上セミナー スピントロニクス理論の基礎」多々良源、河野浩、柴田絢也: 固体物理 (連載) 43, 1-7, 131-143, 265-276, 319-329, 617-627 (2008).

3. 実験物理学シリーズ第5巻「強磁場の発生と応用」(三浦登編) 5.2節「パルス磁場下の電氣的測定」, 長田俊人, pp.264-279 (共立出版, 2008).

4. 「21世紀の物質科学 第5章: ナノの世界で物質を組み立てる」家泰弘(培風館, 2008)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

家泰弘 (IYE YASUHIRO)  
東京大学・物性研究所・教授  
研究者番号: 30125984

(2) 研究分担者

長田俊人 (OSADA TOSHIHITO)  
東京大学・物性研究所・准教授  
研究者番号: 00192526

(3) 連携研究者

小野輝男 (ONO TERUO)  
京都大学・化学研究所・教授  
研究者番号: 90296749

多々良源 (TATARA GEN)  
首都大学東京・都市教養学部・准教授  
研究者番号: 10271529