

研究代表者 家 泰弘  
( 東京大学物性研究所 教授 )

研究課題  
「 微細構造におけるスピン量子物性の開拓 」

研究期間：平成 8 年 1 2 月 1 日 ~ 平成 1 3 年 1 1 月 3 0 日

## 1. 研究実施の概要

電子輸送と磁性は物性科学における2つの中心的な研究テーマである。それは、電荷とスピンという属性を持つ電子が固体中においてどのような集団としての性質を示すかという固体物理の基本問題であると同時に、現代文明を支える電子機器の中核をなす半導体デバイスや磁気デバイスの動作原理の物理的基礎をなすものである。伝導現象の研究と磁性研究とはそれぞれが大きな専門分野をなし、これまで独自の発展を遂げてきた。しかしながら近年、以下に述べるように磁性と密接に絡んだ伝導現象の研究が大きな進展を見せている。その中には新しい原理に基づく実用デバイスとして発展する可能性を秘めたものも少なくない。また基礎物性物理としても、このような研究を通じて積年の問題が新たな視点で見直されつつある。本研究プロジェクト「微細構造におけるスピン量子物性の開拓」では、金属や半導体の表面界面に形成される微細構造において展開される量子現象、なかでも特に、スピン自由度や磁性が関連した量子輸送現象を探究する研究を展開した。

本研究チームは東京大学物性研究所先端領域研究部門の家 泰弘、小森 文夫、勝本 信吾の3研究室による構成でスタートした。その後、本研究チームにポスドクとして参加していた八木隆多氏が平成12年度に広島大学低温センター助教授に着任したことに伴って、八木グループが独立のユニットとしてチームに加わることとなった。本プロジェクトでは、特定の物質を研究対象とするのではなく、むしろ興味ある物理現象ごとにそれが最も明瞭な形で現れる系を選択して実験をデザインするというアプローチを採った。取り組んだテーマは、実験手段の観点から量子伝導関係を表面関係の研究に大別され、前者を主として家・勝本グループが、後者を主として小森グループが担当した。表面関連の実験では、超高真空チェンバー内で系の作製から測定までを一貫してその場で行う必要があることから、実験手法に独特の制約があるためである。しかしながら、物理的には共通する問題も多く見出され、議論は緊密に行った。また、走査トンネル顕微鏡関連の測定や薄膜作製などに関しては技術情報の交換も頻繁に行った。

本研究プロジェクトで行った研究内容は以下の5つの大項目に整理することができる。

- [1] メソスコピック構造半導体2次元電子系の量子輸送とスピン依存効果
- [2] 希薄磁性半導体の磁性と伝導
- [3] 表面ナノ構造磁性体の形成と磁性
- [4] メソスコピック磁性体におけるスピン依存伝導
- [5] メソスコピック超伝導体と磁性

これらのうち、[1][2]は家・勝本グループ、[3]は小森グループ、[4][5]はその中のサブテーマによって家・勝本・小森・八木が分担して研究を遂行した。

以下では上記の分類にしたがって、その研究内容と主な成果の概要を簡単に記す。

- [1] メソスコピック構造半導体2次元電子系の量子輸送とスピン依存効果

周期磁場変調下の2次元電子系の電気抵抗に現れる余剰抵抗が $\Delta\rho = AT^2 + C$ の温度依存性を示すことを見出し、 $T^2$ に比例する項が電子電子散乱効果に起因すること、定数項

は残留抵抗をもたらす不純物散乱と変調磁場との複合効果であること、を明らかにした。

ランダウ準位占有率が  $\nu = 3/2$  近傍の複合フェルミオン領域における磁気抵抗の整合振動（幾何学共鳴効果）を観測し、その共鳴条件の解析から  $\nu = 3/2$  複合フェルミオンが完全スピン偏極しているとの結論を得た。また、超短周期変調をもつ量子井戸の量子ホール状態において  $\nu =$  奇数のスピギャップが顕著に抑制される効果を見出した。

高次ランダウ準位の半占有状態におけるストライプ相（電荷密度波相）が短周期変調ポテンシャルによってどのような影響を受けるかを調べ、 $\nu = 5/2$  から  $25/2$  の広い範囲にわたってストライプ相の出現を示唆する磁気抵抗ピークを観測した。サイクロトロン半径と変調周期との整合関係がストライプ相の安定性に反映される様子が捉えられた。

制御用ゲート電極をもつアハラノフ・ボーム（A B）リングを作製し、通常の電極配置と、曲がり抵抗を測定するときのような非局所測定配置とによるふるまいの違いを調べた。(1)ゲート電圧を変えたとき前者ではA B振動の位相がロックされるのに対して、後者では連続的に変化させられること、(2)A B振動の相対的振幅は後者のほうが大きく、かつ、(3)温度を上げたときの減少（デコヒーレンス）も緩やかであること、を見出した。特に最後の点は、測定のプロープ配置によって電子のデコヒーレンスに違いが現れることを示す重要な結果である。

A Bリングの一方のアームが量子ドットをもつ構造を作製し、A B振動とクーロン振動の共存領域を調べた。この系のクーロン振動に、量子ドットの離散準位とリングの連続準位の共鳴によるファノ（共鳴）干渉パターンが現れることを見出した。クーロン振動の谷においてもA B振動が観測されたことは、ファノ干渉によって局在状態が解消したこと示している。ファノ効果はさまざまな物理過程において見出されているが、メゾスコピック構造での観測は初めてであり、しかもこの系は種々のパラメーターが制御できるという著しい特徴をもつ。

## [ 2 ] 希薄磁性半導体の磁性と伝導

希薄磁性半導体(Ga, Mn)As および (In, Mn)As において、分子線エピタキシー (MBE) 成長後の低温熱処理によって膜質を大幅に向上し、かつ安定化することを見出した。高Mn濃度試料における膜質低下の原因が膜中に取り込まれた過剰AsとMnが形成する複合欠陥にあること、低温熱処理によって過剰Asが蒸発して欠陥が消失するというメカニズムが明らかとなった。さらに、この低温熱処理効果を積極的に利用して同一の試料において伝導度や強磁性転移温度を系統的に変化させつつ物性測定を行う手法を確立した。

希薄磁性半導体における電子状態と強磁性発現機構を探るため赤外分光および軟X線吸収分光測定を行った。赤外スペクトルで 200meV 付近に見出された線幅の広い吸収ピークは半ば束縛されたMnのd軌道を起源とする正孔によるものと考えられ、金属的な伝導を起こしているキャリアーが局在傾向の強い性格を有していることがわかった。Mn 2p領域の軟X線吸収スペクトルは、強磁性Mn<sup>2+</sup> (d<sup>5</sup>) と常磁性Mn<sup>2+</sup> (d<sup>5</sup>) の2つの成分からなり、低温熱処理によって過剰Asが減少するとともに強磁性Mn<sup>2+</sup>の割合が相対的に増加する。また、常磁性Mn<sup>2+</sup>スペクトルの強度変化は強磁性転移温度の変化と良く相関

している．このことはAs正孔を介した運動交換相互作用がMn3d スピン間の強磁性相互作用をもたらしていることを示唆する．

(Ga,Mn)As系では，Mn濃度の増加とともに系が絶縁体から金属に転移し，さらに高濃度側で再び絶縁体に転移する特異なふるまいが見られる．低温熱処理を利用して金属非金属転移直前に試料をチューニングし，磁場誘起非金属金属転移を，有限温度2パラメータ・スケーリング理論によって解析した．

### [3] 表面ナノ構造磁性体の形成と磁性

窒素吸着銅(100)表面に自己形成される7nm間隔の正方格子状ナノ構造を利用して磁性ドット配列を作製する手法を開発し，Co, Fe系についてその構造と磁性を調べた．(1)Coドット配列の磁気転移温度および磁気異方性が一様薄膜と異なるふるまいを示すこと，(2)それが磁気ドット間の相互作用や窒素吸着面上でのCoの磁性に起因していること，(3)Coドット配列では面内磁化であるのに対して，Feの場合には面直磁化であること，などを明らかにした．このようなナノスケール磁性ドット配列を高密度磁気メモリーに応用する可能性について民間企業との共同研究を進めている．

Pt(111)清浄表面上にマグネタイトの単結晶薄膜を作製し，フェルヴェイ転移温度の上下でスピン分解光電子分光を行った．フェルヴェイ転移に伴うスピン分解電子状態密度の変化がフェルミ準位以下1eV程度の範囲でのみ観測され，理論の予想と一致する結果を得た．

### [4] メゾスコピック磁性体におけるスピン依存伝導

磁性金属(Fe)ナノワイヤーの量子化伝導を，極低温STMを用いることにより準静的に調べた．スピン縮退が解けていることを反映して，常磁性金属で観測される量子化コンダクタンスに比べて量子化単位が半分であることを見出した．細線の伸び縮みに対してヒステリシスをもつ電気伝導の跳びが観測され，これと鉄の結晶格子間隔や構造の変化によって生じる磁性変化との関連について第一原理計算との比較が進んでいる．

### [5] メゾスコピック超伝導体と磁性

微小超伝導体に磁場をかけたときの磁束系の状態を単電子トランジスタおよび低温STMを用いて調べた．外部磁場の上げ下げに伴う磁束量子1本1本の出入りを単電子トランジスタを用いて検出し，超伝導体が単連結の場合とリング形状の場合の磁束系の挙動の違いを捕らえた．超伝導微小円板の磁束状態を低温STMにより調べ，アブリコソフ格子状態から多数の磁束量子を抱える巨大渦糸状態への相転移を捉えた．

2次元正方格子超伝導ネットワークの一つおきのボンド上に微小磁性体を付加した系を作製して，チェッカーボード磁場下の超伝導ネットワークの転移を調べた．この系の超伝導相境界が一様磁場およびチェッカーボード磁場の関数として変化する

る様子を観測し、これに対応するモデルのホフスタッター・パタフライ・ダイアグラムと良く一致することを示した。

超伝導体(NbSe<sub>2</sub>)表面上の磁性微粒子(Fe)近傍の極低温走査トンネル分光によって、超伝導/磁性界面の局所電子状態の変化を調べた。孤立したFe微粒子近傍でのトンネルスペクトルは、微粒子周囲に局在した準粒子束縛状態の存在を示した。

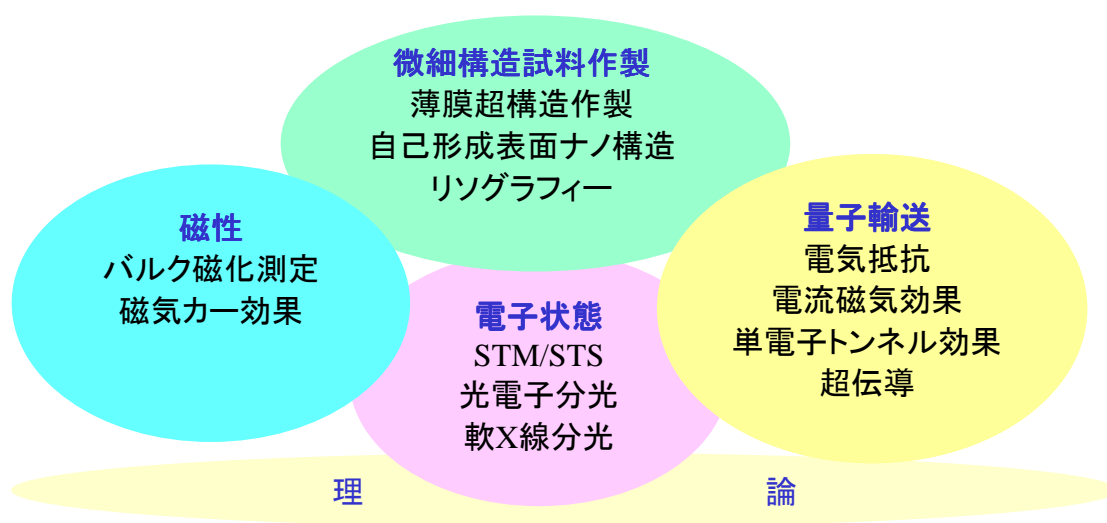
以上述べたように本研究プロジェクトでは、2次元電子系およびそれに人工周期を付加した系、量子ドット、希薄磁性半導体、表面自己形成ナノ構造、金属ナノワイヤー、微細構造超伝導体などを対象として、それらにおける伝導と磁性とのさまざまな関わりを明らかにすることを目指し、いくつかの成果をあげることができた。本プロジェクトの研究活動は基礎物性物理の探求を主眼とするものであり、直接の応用は念頭に置いていなかったが、扱った系のいくつかのものは将来の応用への発展の可能性を秘めている。量子計算など未来の量子デバイスへの関心が高まっているが、そこでの最も基本的な問題は電子のデコヒーレンス機構を明らかにあうることである。この観点から、A Bリング系で見出された「プローブ配置に依存するデコヒーレンス」はさらに追求すべきテーマである。量子ドット/A Bリング系で見出されたファノ干渉効果は、コヒーレンスの制御という観点から応用的にも興味深い。半導体デバイスにおける磁性の利用という観点からは、将来のスピン트로ニクスを支える物質としての希薄磁性半導体が特に注目される。実際の応用に至るまでには物質科学的問題点が山積しているが、本研究で見出された低温熱処理効果は有力な手段となり得る。強磁性体微細構造を用いて作り出すメゾスコピック・スケール空間変化磁場中の電子のふるまいも半導体/磁性体複合デバイスへの発展の可能性を秘めている。ナノスケール構造や表面といった特殊状況での磁性の諸相の解明は、物質科学としての興味とともに磁気応用デバイスの将来発展の基礎としても重要である。

## 2. 研究構想

本研究プロジェクトをスタートするに際して全体目標としたのは、「金属や半導体の表面界面に形成される微細構造における量子現象,特にスピン自由度や磁性が関連した量子現象に着目して新奇な物性を開拓すること」であった。

2次元電子系およびそれに人工周期を付加した系,量子ドット,希薄磁性半導体,表面自己形成ナノ構造,金属ナノワイヤー,微細構造超伝導体などを対象として,それらにおける伝導と磁性とのさまざまな関わりを明らかにすることを目指した。基本方針として,試料はすべて自作することを旨とした。プロジェクト期間が5年間という比較的長期であることを生かして,短期的成果よりも長期的にチームの力を蓄えたいと考えたからである。

試料作製技術や測定技術に関しては,プロジェクト発足以前から培っていた実験諸技術,すなわち GaAs/AlGaAs 系の分子線エピタキシー成長,真空蒸着等による金属薄膜・多層膜作製,電子線描画による微細加工,超高真空表面関連実験技術,極低温・強磁場における伝導測定,走査プローブ顕微鏡,などにさらに磨きをかけると同時に,新たな人工構造作製,磁気光学による磁気測定,低温STM,光電子分光などを適宜開発して研究の幅を広げたいと考えた。高エネルギー分光や赤外分光などについては専門家の協力を得ることとした。

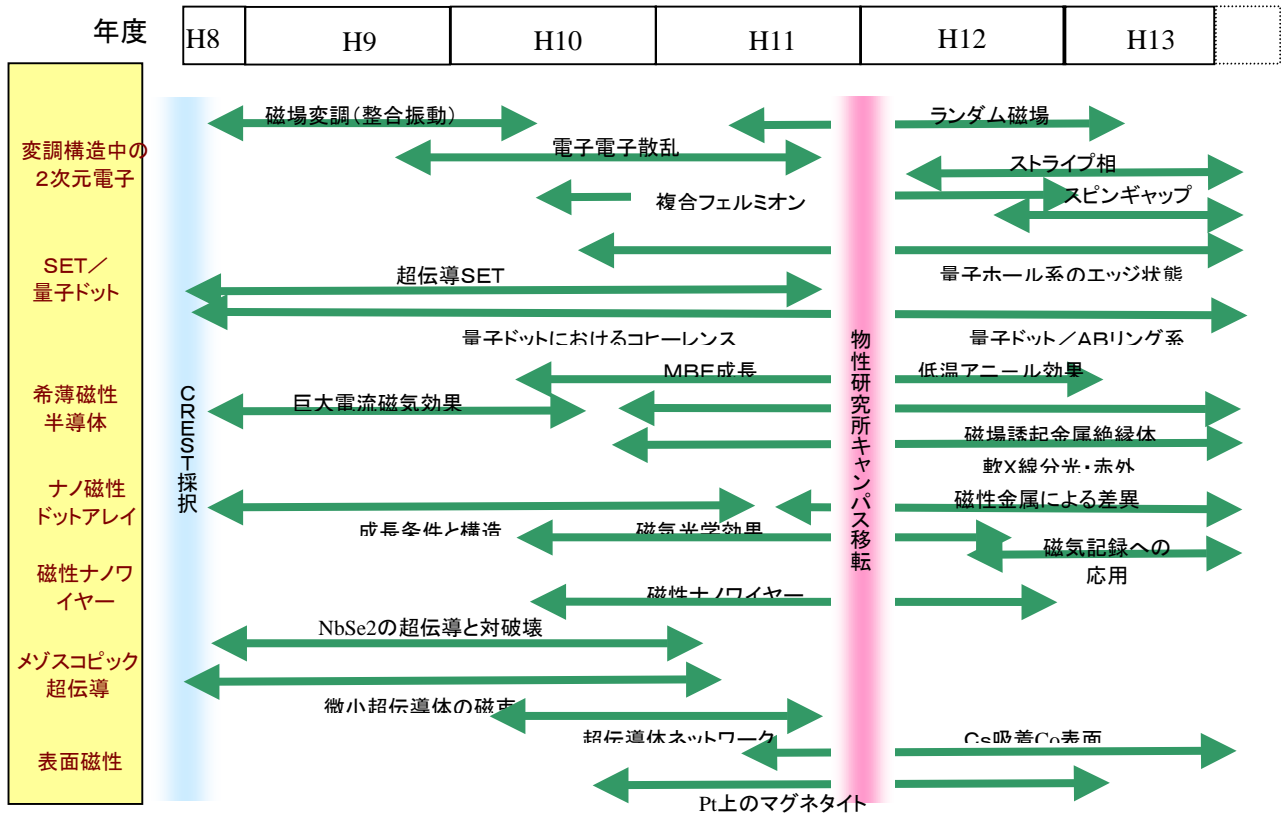


プロジェクト採択とほぼ同時期に,物性研究所の移転計画が具体化し,5年間のプロジェクトの4年目の始めに当たる時期に六本木から柏への移転が予定されることとなった。このことはいろいろな意味で研究の進め方に制約を課し,頭の痛い問題であった。さらに,研究代表者が移転実行委員長を務めたため多大の時間と労力を取られる結果になった。しかしながら振り返ってみれば,柏での新しい実験環境が本研究プロジェクトを推進する上で大きなメリットをもたらした。移転前後に実験がストップしたが,移転後の立ち上げも順調に進み,柏で新たに得られた実験データがプロジェクト成果の主要部分を構成することになったのは,チームメンバーの奮闘のおかげと感謝している。

次節以降で詳しく述べるように,本プロジェクトで取り組んだ研究テーマは

- [ 1 ] メゾスコピック構造半導体 2次元電子系の量子輸送とスピン依存効果
  - [ 2 ] 希薄磁性半導体の磁性と伝導
  - [ 3 ] 表面ナノ構造磁性体の形成と磁性
  - [ 4 ] メゾスコピック磁性体におけるスピン依存伝導
  - [ 5 ] メゾスコピック超伝導体と磁性
- という大項目に整理することができる。

個々のテーマへの取り組みは、チームメンバー特にポスドクや大学院生の異動による影響を少なからず受けたが、主要テーマに関しては概ね継続性を確保することができた。研究活動の年次進行の概要を下表に示す



当初の研究構想で立てた研究計画は、テーマごとにその達成度に差はあるものの、全体としてはほぼ初期の目標を達したと考えている。しかしながら、当初の研究構想に含まれていたものの、その後の展開によって計画の変更を余儀なくされたテーマもいくつかある。以下はそのリストである。

- (1) 希薄磁性半導体に関しては、磁性と伝導の実験に加えて光学的測定によってスピンドイ

ナミクスを追うことを想定して準備を進めていたが、実際には(Ga,Mn)As自身はほとんど発光を示さないことがわかった。多層構造にしてスピンの情報を光学活性の層に引き出すなどの戦略転換が必要であり、その方向で準備を進めている。

(2)微小磁性体の量子力学的ふるまい(MQTなど)の研究もプロジェクト開始当初のスコープに入れていた。希薄磁性半導体(バルク)試料が希釈冷凍機温度で巨大バルクハウゼンジャンプを示す現象を見出したが、熱的アヴァランシュ現象である可能性もあってMQTとの関係を明らかにする決め手を欠いた。研究担当者の異動もあってこのテーマは中途半端に終わってしまった。

(3)InAs系半導体と強磁性金属の複合系におけるスピン注入実験も構想していたが、金属と半導体間の伝導度ミスマッチによる本質的困難がシュミット(Schmidt)らによって指摘されたこともあり、強磁性金属と半導体のハイブリッド構造はもっぱら磁場変調に利用することとして、スピン注入のための磁性体としては希薄磁性半導体を中心として考える方向に方針を転換した。

(4)磁性ドットアレイについても、時間分解分光実験を行ってスピンドYNAMICSを追うところまで進めたいと考えていたが、マンパワーの不足もあって目標達成には至らず、今後の課題として残されている。



### 3. 研究内容

本節では、研究内容およびその成果を以下の項目に分けて詳述する。

- [1] メゾスコピック構造半導体 2次元電子系の量子輸送とスピン依存効果
- [2] 希薄磁性半導体の磁性と伝導
- [3] 表面ナノ構造磁性体の形成と磁性
- [4] メゾスコピック磁性体におけるスピン依存伝導
- [5] メゾスコピック超伝導体と磁性

#### 3.1 メゾスコピック構造半導体 2次元電子系の量子輸送とスピン依存効果

##### (1)実施の内容

分子線エピタキシー ( M B E ) 装置によって自作したGaAs/AlGaAs半導体ヘテロ構造 2次元電子系試料をベースとして、様々な微細加工を施すことにより変調構造や量子ドット構造を作製し、それらにおける低温量子輸送現象の研究を展開した。微細加工においては、本プロジェクト予算で整備した電子線描画装置が有効に活用された。

GaAs/AlGaAsヘテロ構造試料の表面に楕円構造をもつゲート電極を付けることによって 2次元電子系に周期ポテンシャルを印加することは広く行われている。本研究では、ゲート電極を強磁性金属で作製してその磁化を外部磁場で制御することにより空間変調磁場を印加した 2次元電子系のふるまいを調べた。

強磁場下で現れる量子ホール系の諸相においてスピン偏極がどのようになっているかは強相関効果の典型的な問題である。本研究では短周期ポテンシャル変調下のふるまいを調べることによって、量子ホール系、特に複合フェルミオンのスピン偏極を調べた。さらに、微傾斜基板上の M B E 成長によって作製した超短周期変調が加わった量子井戸試料 (大阪大学基礎工学研究科・冷水研究室からご提供いただいた) を用いて、整数量子ホール状態の励起エネルギー (サイクロトロンギャップとスピングャップ) のふるまいを調べた。

半導体 2次元電子系をベースとして、スプリットゲート構造によって量子ドットを作製することは広く行われている。本研究ではアハラノフ・ボーム ( A B ) リングに量子ドットを埋め込んだ系を作製し、クーロン閉塞による電荷離散性と位相干渉との絡み合いを調べた。

量子ホール状態では試料の端に一方の向きにのみ伝導を担うチャンネル (カイラル・エッジ状態) が形成される。エッジ状態のふるまいについて知見を得る目的で、半導体 2次元電子系の表面に単電子トランジスタを作製し、これを化学ポテンシャルの局所プローブとする実験を行った。また、GaAs/AlGaAs超格子試料の垂直伝導測定を行い、エッジ状態の層間結合により多層量子ホール系に形成されるカイラル表面状態の性質を調べた。



図 3-1 : 高移動度 GaAs/AlGaAs ヘテロ構造試料作製用分子線エピタキシー装置



図 3-2 : 電子線描画装置 : L a B。電子源のタイプ (上図) と電界放出型電子源のタイプ (下図)

【研究担当】

家 泰弘, 遠藤 彰, 加藤 真由美, 安藤 正人, 坂入 誠, 原 正大, 寺田 達夫	変調構造をもつ 2 次元電子系の量子輸送
勝本 信吾, 平澤 正勝, 小林 研介, 北地 三浩, 相川 恒	量子ドット + A B リング系におけるコヒーレンス
家 泰弘, 勝本 信吾, 遠藤 彰, 川村 稔, 藤岡 博幸	エッジ状態および多層量子ホール系

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

A. 空間変調磁場中の 2 次元電子系の輸送現象

2 次元電子系に 1 次元周期変調ポテンシャルを印加した系の低磁場磁気抵抗に磁場の逆数に対して周期的な振動が現れることはワイス(Weiss)らによって 1989 年に発見された。この現象は、変調周期  $a$  とサイクロトロン半径  $R_c = \hbar k_F / eB$  との幾何学共鳴による半古典効果であり、整合振動(Commensurability Oscillation)あるいはワイス振動と呼ばれている。われわれは通常の静電ポテンシャル変調ではなく、磁場の空間変調(あるいはベクトルポテンシャル変調)を 2 次元電子系に印加した系(図 1-3)を作製してその輸送現象を調べた。図 1-4 に示したように、低磁場領域に整合振動が見られる。

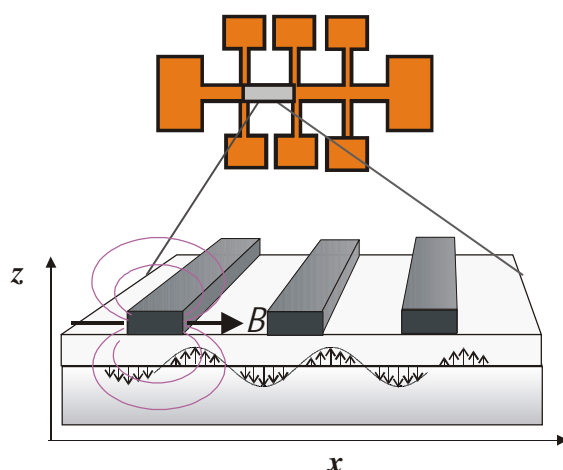


図 1-3: GaAs/AlGaAs ヘテロ構造に強磁性体アレイを配した試料。2 次元電子系には図のような変調磁場がかかる。

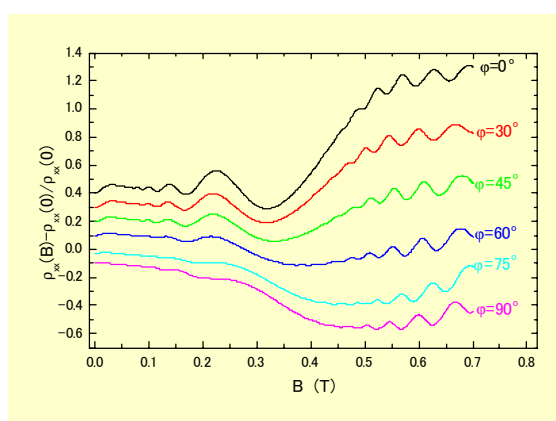


図 1-4: 1 次元変調磁場がかかった 2 次元電子系の磁気抵抗に現れる整合振動(磁気ワイス振動)効果。磁場変調の強さは外部磁場の方位角によって制御される。

抵抗極小となる条件は，通常の静電ポテンシャル変調の場合は  $\frac{2R_c}{a} = n - \frac{1}{4}$  ( $n=1,2,3,\dots$ )となるのに対して，磁場変調の場合は  $\frac{2R_c}{a} = n + \frac{1}{4}$  となる．2次元電子系

に印加される磁場変調の強さは（静電ポテンシャルの場合と違って遮蔽効果が無視できるので）簡単な静磁気学的計算によって求めることができる．また整合振動の振幅の解析からも求めることができる．2次元面に平行な磁場を用いることにより，電子の軌道運動に影響を与えることなく強磁性体ゲートの磁化を制御することができ，同一条件のもとに変調振幅をゼロから最大値（典型的な値として数十mT）まで連続的に変化させることができる．

変調磁場がかかった系で一様な垂直磁場成分がゼロの場合，すなわち平面磁気超格子(Lateral Magnetic Superlattice)における電気伝導のふるまいを，磁場変調がかかっていない場合と比較した(図1-5)．磁場変調によって生じる余剰抵抗  $\Delta\rho$  は変調磁場振幅  $B_0$  の3/2乗に比例し， $\Delta\rho = AT^2 + C$  の温度依存性を示すことを見出した． $T^2$ に比例する項は電子電子散乱効果に起因する．このことは，電子温度を上げた測定によって立証した(図1-6)．また定数項は，残留抵抗をもたらす不純物散乱と変調磁場との複合効果であること，が佐々木・福山の理論との比較により明らかになった．この系は，電子電子散乱に関して理論との定量的比較が可能なモデル実験系を提供するものである．

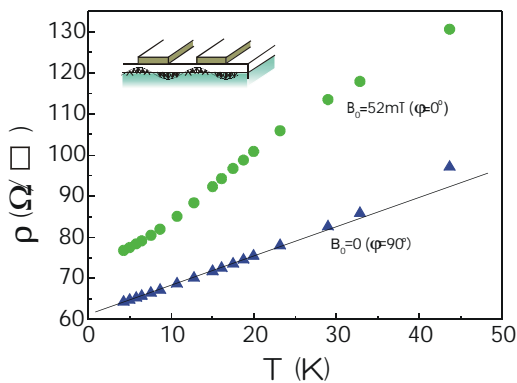


図 1-5：空間変調磁場（平面磁気超格子）による余剰抵抗．変調がない場合の抵抗の温度依存性は音響フォノン散乱による  $T$  の1次の項が支配的である．

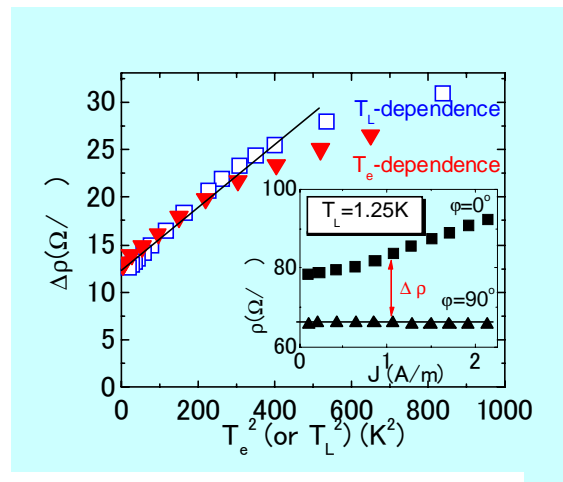


図 1-6：余剰抵抗  $\Delta\rho = AT^2 + C$  の  $T^2$  項が電子電子散乱によるものであることは，電子温度を変化させた実験によって立証される．

微細加工強磁性体を利用して2次元電子系に空間変化磁場をかけるというアイデアはわれわれ独自のものである．磁場変調による磁気抵抗振動（ワイス振動）の発見はわれわれのグループ，マックスプランク研究所（独），ノッティンガム大学（英）の3者でほぼ同時に達成された．電子電子散乱の効果調べる実験については，ワイツマン研究所（イスラエル）のグルー

ブが静電ポテンシャルで先駆的な研究を行っている。磁場変調下で  $\sim T^2$  の抵抗のふるまいはノッチング大学のグループが報告しているが、変調振幅や電子密度を系統的に変化させて、理論との定量的比較を行っているのはわれわれだけである。

## B. 複合フェルミオンのスピン偏極

GaAs の伝導帯の  $g$  因子は  $g = -0.44$  という小さな値であるため強磁場中においても裸のゼーマン分裂はさほど大きくない。量子ホール系のスピン偏極は交換相互作用の効果、すなわち遍歴強磁性の現れである。したがって量子ホール系の諸相のスピン状態がどのようになるかは決して自明な問題ではない。事実、 $\nu = 8/5$  などではスピン非偏極状態からスピン偏極状態への転移が観測されている。

$\nu = 1/2, 3/2$  など偶数分母のランダウ準位占有率の状態は複合フェルミオン描像でよく記述される。複合フェルミオンのスピン状態に関する研究で、 $\nu = 1/2$  については完全スピン偏極であることが確立しているが、 $\nu = 3/2$  についてはこれまで互いに矛盾する結果が報告されていた。本研究では短周期 ( $a = 92\text{nm}$ ) のポテンシャル変調を付加した高移動度 2次元電子系において、特に  $\nu = 3/2$  近傍の複合フェルミオン領域のふるまいを調べた(図 1-7)。ポテンシャル変調を付加した系では、(1)人工変調構造による磁気抵抗整合振動が現れること、(2)その整合条件が複合フェルミオンに対する「有効磁場」変調によるものであること、(3)  $\nu = 3/2$  の複合フェルミオンのモデルから予想される通り、有効磁場の変化分は実磁場の変化分の 3 倍になっていること、(4)そして、その共鳴条件は  $\nu = 3/2$  複合フェルミオンが完全スピン偏極していると仮定した場合の予想と一致していること、などの結論を得た(図 1-8)。

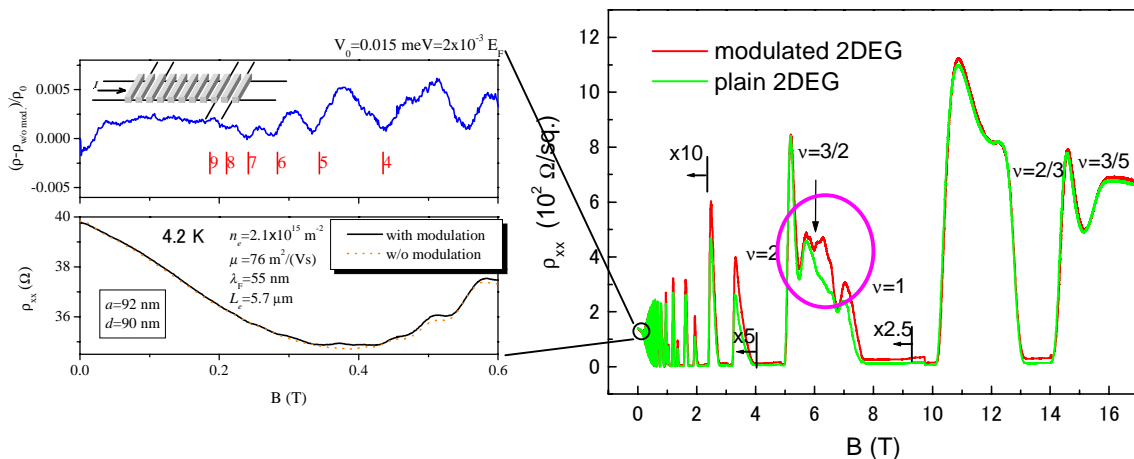


図 1-7：短周期ポテンシャル変調を付加した 2次元電子系の磁気抵抗。ゼロ磁場付近では静電ポテンシャル変調によるワイス振動が観測される(左図)。 $\nu = 3/2$  近傍では、変調を付加した試料(赤)と付加していない試料(緑)の間にふるまいの違いが見られる。この領域の詳細は図 1-8 に示す。

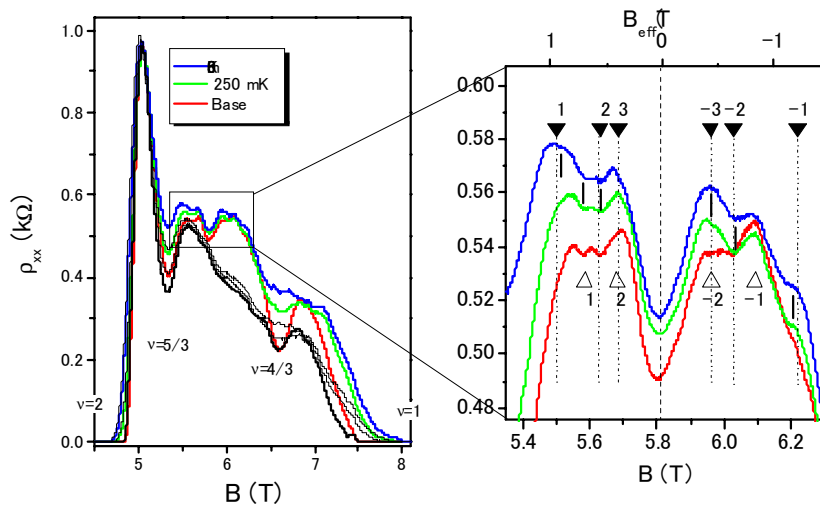


図 1-8: 図 1-7 の磁気抵抗の  $\nu = 3/2$  近傍の拡大図．変調を付加した試料では有効磁場変調による整合振動を反映した構造が見られる．右図において  $\Delta$  は完全スピン偏極， $\nabla$  はスピン非偏極を仮定したときに予想される抵抗極小の位置．実験データは前者と一致している．

### C . 高次ランダウ準位におけるストライプ相

移動度が  $10^7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  を超えるような超高品質の 2 次元電子系では，高次ランダウ準位の半占有状態 ( $\nu = 9/2, 11/2$  など) 付近で抵抗に巨大な異方性が現われることがアイゼンシュタイン (Eisenstein) らによって報告された．この異方的状態はストライプ相 (電荷密度波相) の出現を反映したものと理解されている．移動度が  $10^6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  程度の 2 次元電子系では異方的状態は観測されないが，それがストライプ相の不在を示すのか，あるいはストライプ相が細かいドメイン構造を形成するために巨視的試料では異方性が見えないのか，が不明であった．ストライプの周期と同程度の周期のポテンシャル変調を印加することにより，ストライプ相を巨視的に安定化させることが可能ではないかとの予想に基づいて実験を行ったところ， $\nu = 5/2$  から  $25/2$  の広い範囲にわたってストライプ相の出現を示唆する磁気抵抗の構造が観測された (図 1-9)．変調を付加しない 2 次元電子系の場合  $\nu = 5/2$  と  $7/2$ ，すなわち  $N = 1$  ランダウ準位では (平行磁場を印加しない限り) ストライプ相は基底状態ではないとされているが，本研究のようにポテンシャル変調を印加した系の場合には  $N = 1$  ランダウ準位でもストライプ相が安定化されることが注目される (図 1-10)．さらに，サイクロトロン半径と変調周期との整合関係によってストライプ相の安定性に变化することを示唆する結果を得た (図 1-9)．

分数量子ホール効果や高次ランダウ準位における新しい多体状態に関する研究は，超高移動度試料を用いているカリフォルニア工科大学やベル研究所・プリンストン大学のグループの独走の感がある．ただし，本研究のように人工構造との組み合わせによって，世界最高級ではない移動度の試料でも，興味深い研究が可能である．



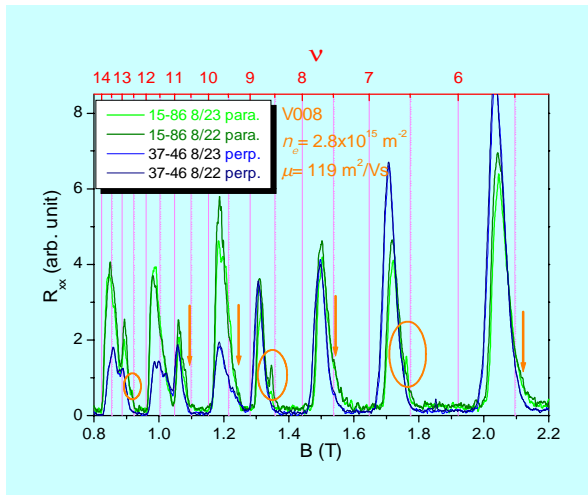


図 1-9：ストライプ相の出現を示唆する構造の強さはランダウ準位占有率に対して非単調な変化を示す．永続光電流効果によって電子密度を系統的に変化させた実験から，変調周期とサイクロトロン半径との整合関係の効果を示唆する結果が得られた．

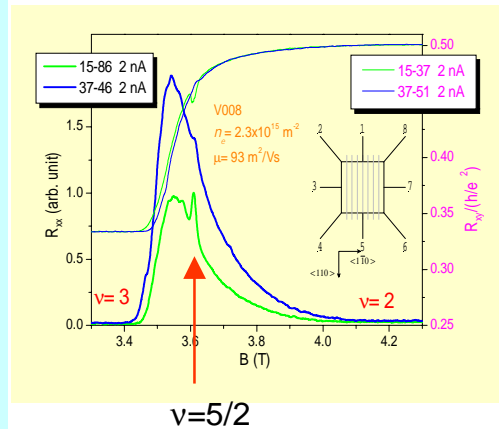


図 1-10：短周期ポテンシャル変調を付加した 2 次元電子系では，高次ランダウ準位の半占有状態付近においてストライプ相の出現を示唆する構造が観測される．本図は  $\nu = 5/2$  付近で観測された磁気抵抗ピーク．

#### D．超短周期変調による量子ホール系のスピンギャップの抑制

GaAs(775)B 基板上的 MBE 成長によって作製された超短周期変調 ( $a = 12\text{nm}$ ) をもつ量子井戸試料 (図 1-11, 大阪大学基礎工学研究科・冷水研究室で作製) の整数量子ホール状態の活性化エネルギーを測定した．図 1-12 に見られるように，例えば  $\nu = 3$  の量子ホール効果は希釈冷凍器温度においてようやく発達しており，励起エネルギーが極めて小さいことが窺える．

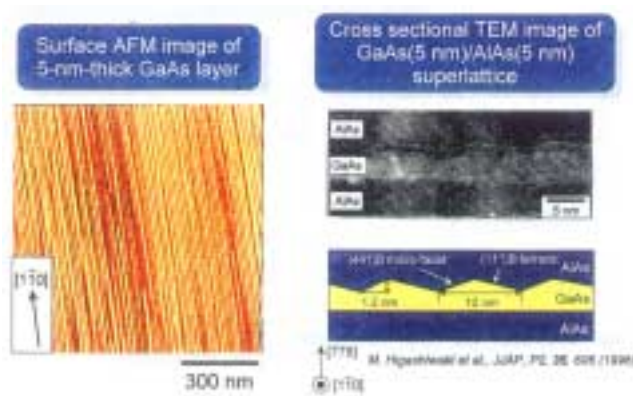


図 1-11：GaAs(775)B 基板上的 MBE 成長によって作製された，超短周期変調構造量子井戸試料．左図は AFM 像．右図は断面 TEM 像と量子井戸構造の模式図．

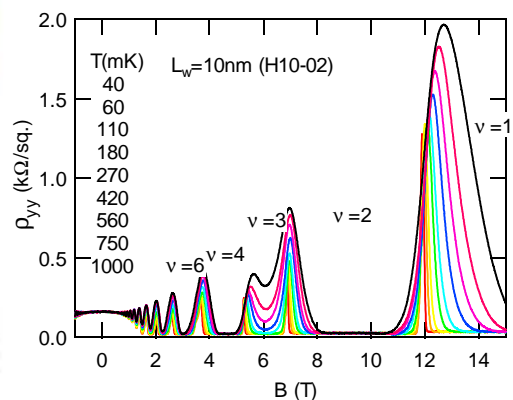


図 1-12：超短周期変調構造量子井戸試料の量子ホール効果． $\nu =$  奇数の量子ホール状態は抑制されている．

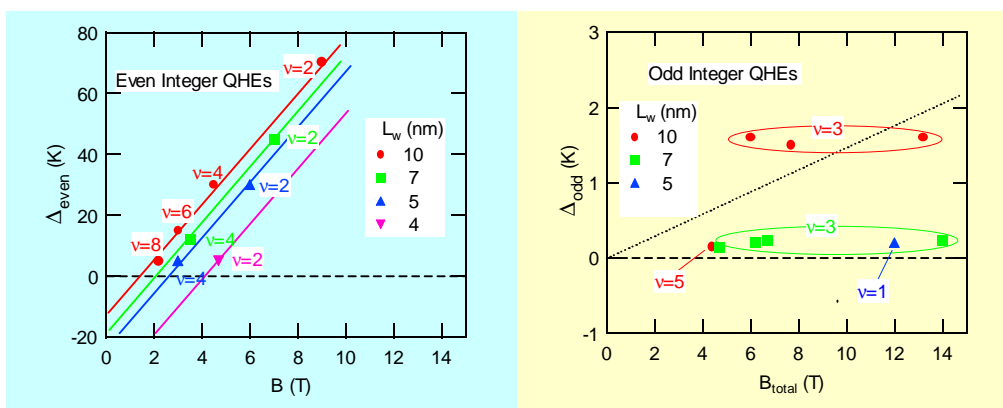


図 1-13：超短周期変調量子井戸(井戸幅  $L_w = 10, 7, 5, 4 \text{ nm}$ )における，偶数占有率(左図)および奇数占有率(右図)量子ホール状態の励起エネルギー。

図 1-13 は，いくつかの井戸幅の試料について，各量子ホール状態の励起エネルギーを磁場の関数としてプロットしたものである． $\nu =$  偶数における励起エネルギーは，サイクロトロンエネルギー（の半分）に散乱による幅を考慮した  $\Delta = \frac{1}{2} \hbar \omega_c - \Gamma$  で与えられる．それに対して  $\nu =$  奇数の励起エネルギーは，値が小さく，かつ磁場依存性も小さい．この系におけるスピングャップの抑制には，上記の変調による交換分裂の抑制効果の他に，狭井戸幅試料における波動関数の障壁層への浸み出しによる  $g$  因子の変化も効いているものと考えられる．

通常の微細加工では作製不可能なナノスケールの超周期構造を作製する試みは多くの研究グループが取り組んでいる．微傾斜基板への結晶成長を用いる方法も数多く行われているが，本研究で扱った系は他の方法に比べて規則性が非常に高い．自己形成の超周期構造と微細加工を組み合わせることにより，従来には無い人工構造作製の可能性が考えられる．ただし，分数量子ホール効果などさらに興味深い多体状態に関する研究を展開するには，乱れの影響がかなり強いことは否めない．

### E．SETによるエッジ状態の観測

単電子トランジスタを2次元電子系の表面に作製し(図 1-14 の上図)，これを化学ポテンシャルの局所プローブとする手法を開発した．図 1-14 の下図は2次元電子の化学ポテンシャルが磁場とともに鋸歯状に変化するようすをとらえている．

エッジチャネルの空間分布に関する情報を得るために，サイドゲートを用いてSETとエッジの距離を変化させる構造とした．SET直下の2次元電子系が非圧縮性の時にはクーロン振動が測定できずノイズのみが観測される(図 1-15)．サイドゲートに負の電圧を印加してエッジチャネル(圧縮性)がSETの直下に来たところでクーロン振動は回復する． $\nu = 1$  量子ホール状態についてはこのような方法で圧縮性の伝導チャネルを検出することができる(図 1-16)．一方， $\nu = 2/3$  数量子ホール状態については同様の測定方法が適



用できない．これは、エネルギーギャップが小さいため $\sigma_{xx}$ が有限に残るためである．しかし、この場合にも周波数依存応答関数を測定することで非圧縮性を検出できる．図1-17は、 $\nu = 2/3$ 後の磁場での応答関数の測定結果を示している． $\nu = 2/3$ に近づくにつれてカットオフ周波数が小さくなり、 $\sigma_{xx}$ が少している様子がわかる．この方法により、分数量子ホール状態の非圧縮性の検出も可能となった．

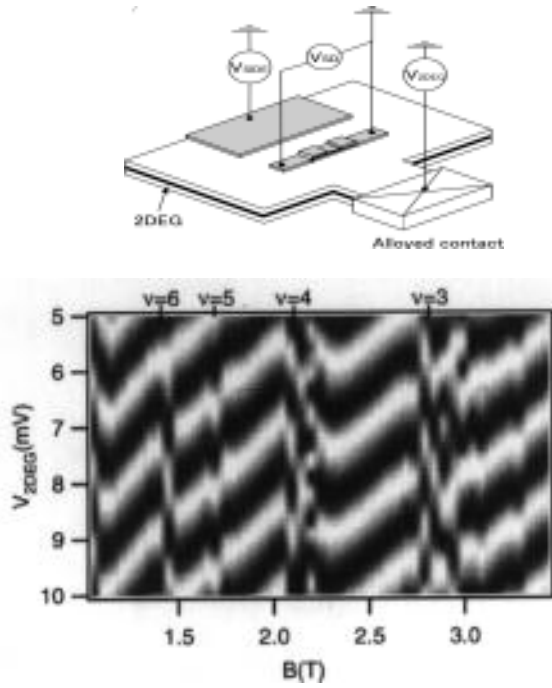


図 1-14 : (上図) 2次元電子系表面上に単電子トランジスタ(SET)を試料．(下図) SETのクーロン振動の磁場による変化．SET直下の2次元電子系の化学ポテンシャル変化を反映している．

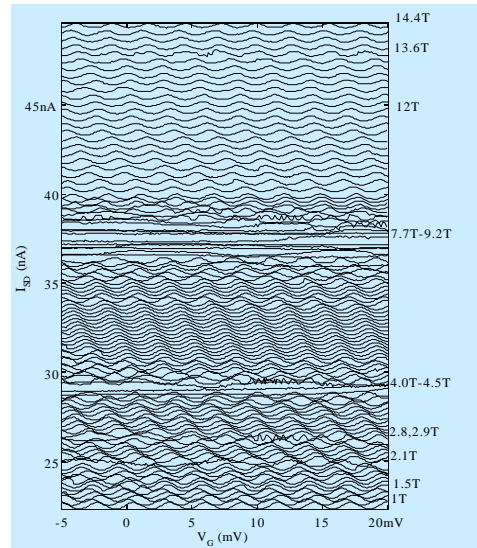


図 1-15 : 量子ホール領域における, SETのクーロン振動の変化．SET直下の2次元電子系が圧縮性であるか非圧縮性であるかを反映してノイズの様子が変化する．

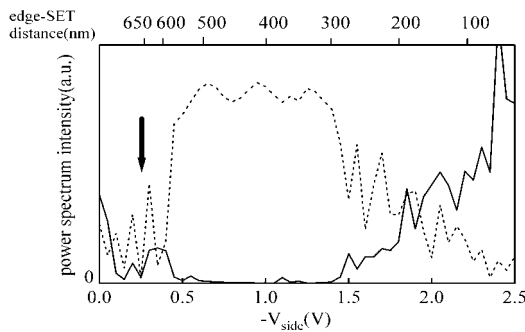


図 1-16 : パルクを  $\nu = 1$  状態としてサイドゲートを変化させたときの, SETのクーロン振動のフーリエ成分の変化．点線はクーロン振動の周波数成分, 実線は高周波成分(ノイズ)を示す．矢印で示された電圧でサイドゲート下の2次元電子系が完全に空乏化される．

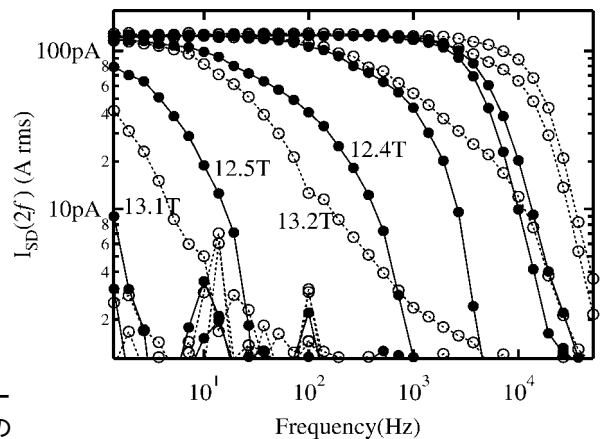


図 1-17 :  $\nu = 2/3$  前後の磁場での SET直下の2次元電子系の応答関数．● : 12.1T~12.7T．○ : 12.8T~13.4T．

単電子トランジスタによるエッジ状態の研究はドイツマックスプランク研究所などで行われている。また、STMやAFMなどの局所プローブを用いた電子状態の視覚化もMIT, ハーバード大学その他多くの研究機関で取り組みが行われている。

#### F. 多層量子ホール系におけるカイラル表面状態

多層量子ホール系では、エッジ状態間の層間結合によってカイラル表面状態という特異な2次元伝導状態が形成されることが理論的に予測されている。GaAs/AlGaAs 半導体超格子の垂直伝導を量子ホール効果領域において希釈冷凍機温度において測定した(図 1-18)。電流バイアスが小さい極限で十分低温ではバルク状態は局在してカイラル表面状態による伝導が残るが、バイアスを増加してゆくとバルクの局在状態を通したホッピング伝導が現われることが見出された(図 1-19)。カイラル表面状態による伝導の領域における横磁場(層に平行な磁場)の効果を調べた。磁場中で試料の角度を変えた一連の測定によって  $\nu=2$  および  $\nu=1$  における垂直伝導度の横磁場依存性を求めたところ、横磁場によって垂直伝導度は大きく減少することが見出された。カイラル表面状態に対する磁気抵抗効果と平行磁場による層間ホッピング抑制の2つの機構が考えられるが、後者が支配的と考えられる。

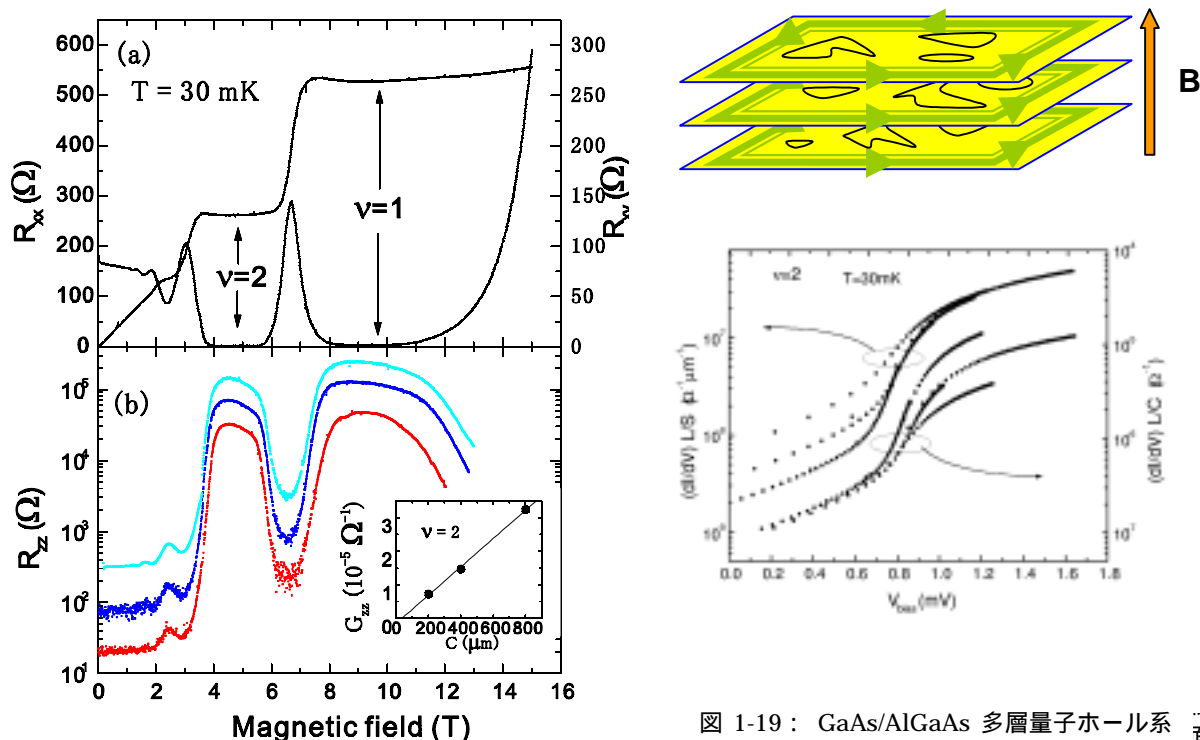


図 1-18: GaAs/AlGaAs 半導体超格子の(a) 面内伝導, と(b)垂直伝導。下図の3つのデータは面積の異なる3つのメサ試料のデータを示す。

図 1-19: GaAs/AlGaAs 多層量子ホール系の垂直伝導における非線形伝導効果。低バイアスではカイラル表面状態が伝導を担うが、高バイアスではバルク状態にも電流が流れる。

量子ドットにおけるクーロン・ブロッケード現象は電荷の離散性、すなわち電子の粒子

性，を顕著に示す現象である．一方，アハラノフ・ボーム(A B)効果など一連の位相干渉効果は電子の波動性を反映した現象である．両者のせめぎあい，あるいは，相乗効果を調べる目的で図 1-20 のようにA Bリングのアームに量子ドットを埋め込んだ系を作製し，低温におけるふるまいを調べた．図の試料はゲートバイアスのかけ方によって，(1)単純なA Bリング，(2)単純な量子ドット，(3)制御ゲートを持つA Bリング，(4)片側のアームに量子ドットをもつA Bリング，(5)両側のアームに量子ドットをもつA Bリング，など様々な状況が実現できる．

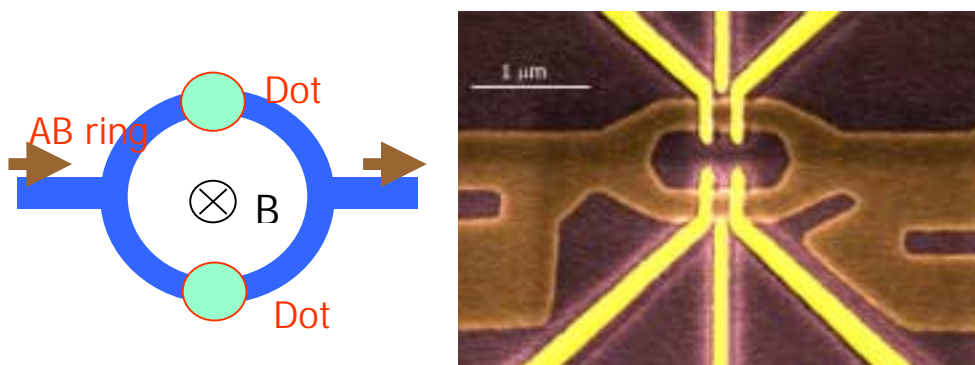


図 1-20: A Bリングのアームに量子ドットを埋め込んだ系の概念図(左図)とSEM写真(右図)

ゲート電極をすべて開いて系を単純なA Bリングとし，電流および電圧プローブのとり方として，図 1-21 に示した2種類の配置(局所配置と非局所配置)を採って，A B振動のふるまいを調べた．グラフの縦軸を比較するとわかるように，通常電極配置(局所配置)でのA B振動振幅が全体の抵抗の高々2%程度であるのに対して，非局所測定

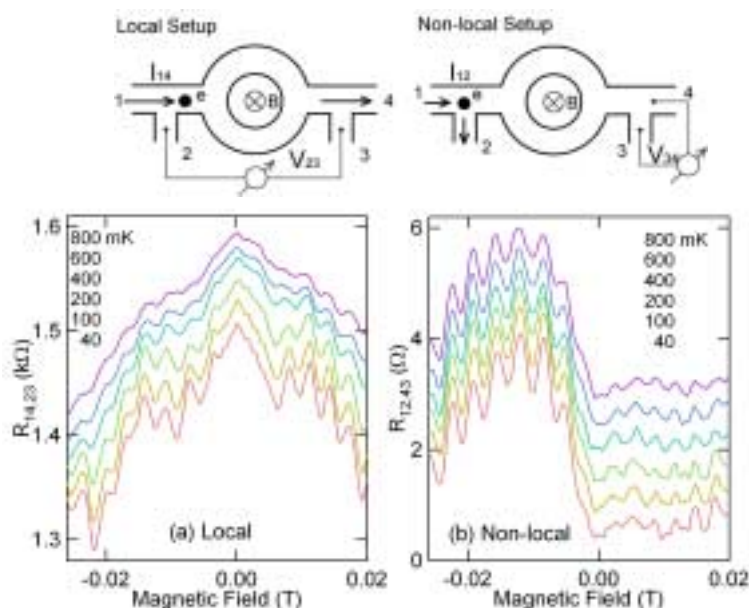


図 1-21: 電流電圧プローブの局所配置(左図)および非局所配置(右図)によるA B振動の測定．ではA B振動の相対振幅が大きく，平均20%，最大70%にも達する．すなわち，非局

所配置は A B 振動成分を相対的に有効に抽出する測定になっている．局所配置の信号が磁場の正負に対してほぼ対称であるのに対して，非局所配置では大きな非対称性が見られる．

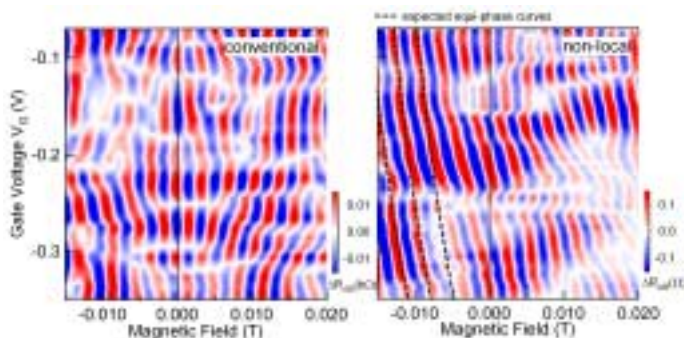


図 1-22：ゲート電極によって静電ポテンシャルを変化させたときの A B 振動の位相変化．局所測定では位相が 0 または  $\pi$  に固定されていて，ところどころに  $\pi$  だけの位相の跳びが見られるのに対して，非局所測定ではゲートバイアスに対して位相が連続的に変化している．

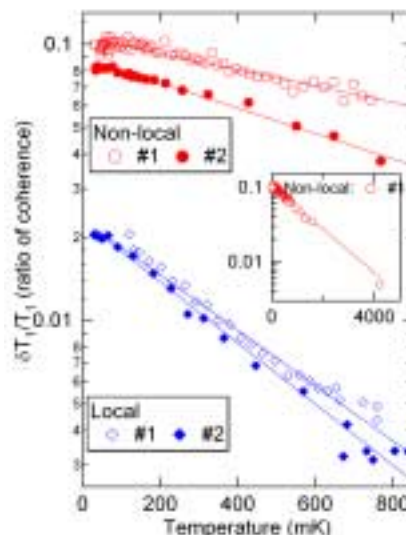


図 1-23：局所配置と非局所配置での A B 振動の振幅の温度依存性からもとめたデコヒーレンスの違い．

磁場に対する非対称性に関してさらに調べるために，A B リングのゲート電極の一つを使って静電ポテンシャルを変化させ，それに伴う A B 振動の位相変化を観測した結果が図 1-22 である．局所配置は実効的に 2 端子測定となっているため，オンサーガーの相反定理によって A B 位相が固定されるのに対して，非局所測定ではそのような制約がないため位相が連続的に変化する．これらのふるまいはランダウアー・ビュティカー (Landauer-Buttiker) 公式に基づく考察により理解できる．

図 1-21 はまた，A B 振動の温度変化を示している．図からも明らかなように非局所配置では比較的高温まで A B 振動が減衰せずに持続する．ランダウアー・ビュティカー公式を用いてこれを透過係数の温度依存性に焼きなおして示したのが図 1-23 である．温度依存性は  $\delta T / T_1 \propto \exp(-aT)$  に従うことがわかる．デコヒーレンスへの寄与としては thermal broadening によるものと電荷ゆらぎによるデコヒーレンスとが考えられる．前者は非局所配置と局所配置で同様に働くはずなので，後者の寄与がプローブ配置によって異なるためと考えられる．この原因に関して現時点で最終的な結論は出せないが，A B リングの部分への正味の電流の流れ方の違いによって電荷ゆらぎの大きさが異なっているという可能性が考えられる．いずれにしても，プローブ配置によってデコヒーレンスに違いが出るというのは従来認識されていなかった点であり，量子計算・量子情報処理など将来の重要課題と目されている研究において重要な視点となる．



## H. 量子ドットを埋め込んだA Bリングにおけるファノ共鳴

図 1-20 のゲート電極のバイアスを適当な条件に選ぶことにより，図 1-24 のように片側のアームに量子ドット，もう一方のアームに制御ゲート電極をもつA Bリングの状況を作って，クーロン振動とA B振動との共存領域を調べた．

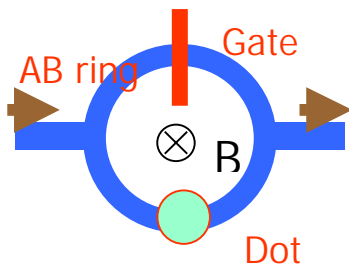
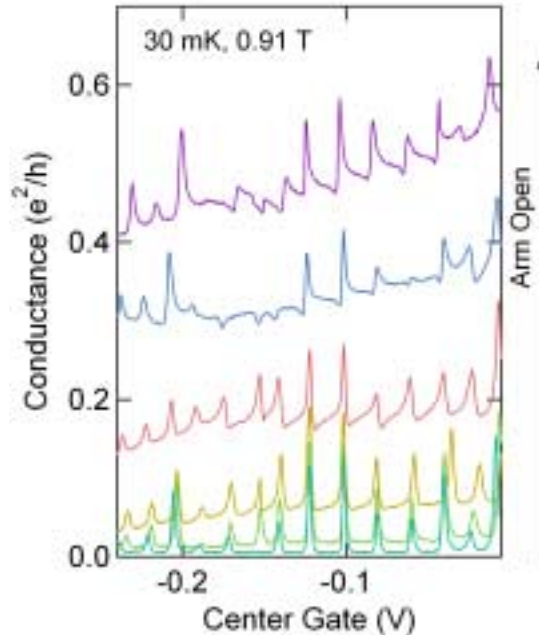


図 1-24：片側のアームに量子ドット，もう一方のアームに制御ゲート電極をもつA Bリング(上図)．上側アームのゲートを閉めた状態(単純な量子ドット)から，ゲートを開いてコンダクタンスを上げてゆくと，クーロン振動の波形が特徴的な非対称性を示すようになる(右図)．



下側アームのゲートに適当なバイアスをかけて量子ドットを形成する．上側アームのゲートに負の大きなバイアスをかけてピンチオフした状況では，図 1-24 右図の一番下に示したような通常のクーロン振動が観測される．上側アームのゲートを徐々に開いてコンダクタンスを増加させると，クーロン振動の波形に特徴的な非対称性が現れる．これは量子ドットの離散準位と上側アームの連続準位との共鳴によるファノ(共鳴)干渉パターンにほかならない．ファノ共鳴線形は

$$F(\varepsilon) \propto \frac{(\tilde{\varepsilon} + q)^2}{(\tilde{\varepsilon}^2 + 1)}, \quad \tilde{\varepsilon} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\Gamma/2}$$

という式で表される．図 1-25 に示すように各々のクーロン振動ピークごとに，その非対称線形は上式でよくフィットできる．フィッティングから得られる結合定数  $q$  の値はコンダクタンスの大きさと相関している．コヒーレンスの強いところではクーロンピークがディップに変化する様子も見られる．図 1-26 は有限温度の効果を示している．高温で系のコヒーレンスが失われるにしたがって，ファノ効果に特徴的な非対称線形は消え，バックグラウンドのコンダクタンスに幅の広がった通常のクーロン振動がのった形，すなわち量子ドットを含むアームと上側アームとの古典的並列回路のふるまいに移行する．

ファノ干渉はさまざまな物理過程において見出されているが，今回の観測は，メゾスコピック系におけるファノ干渉の明確な検証である．この系の特徴はパラメータ領域をゲー

トと磁場という外部パラメータで制御できるという点にあり，ファノ物理を系統的に調べるモデル系を提供している．

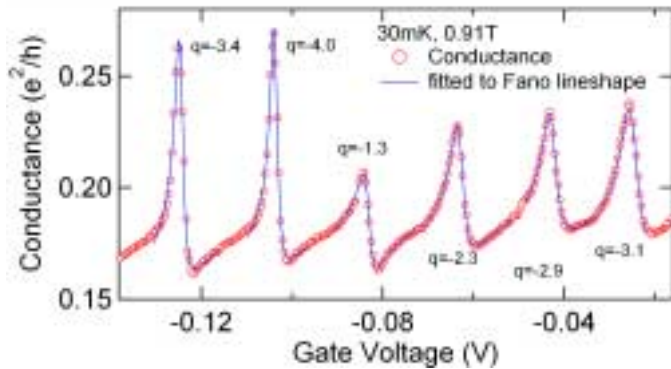


図 1-25：クーロン振動に見られるファノ線形のフィッティング．

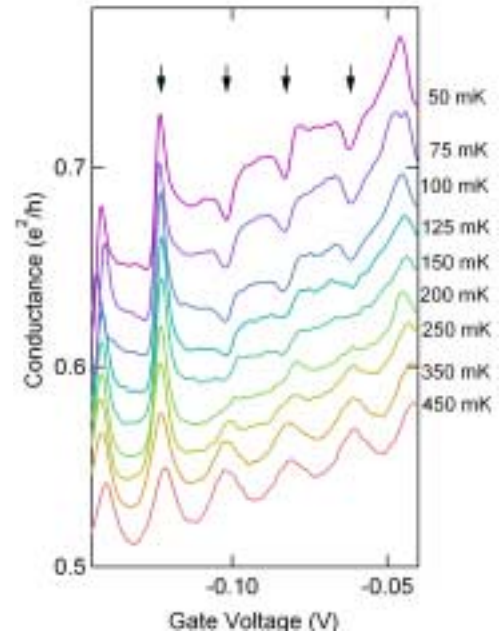


図 1-26：有限温度におけるファノ効果の消滅．

図1-27はファノ共鳴が見られる条件において，量子ドットの中央ゲート電圧を変えながら，ソース・ドレイン電流電圧（ $I-V$ ）特性を調べた結果である．クーロンダイヤモンドの中心（ゼロバイアス）付近に共鳴状態を示すピークが見られる．

量子ドットの離散準位とA Bリング・アームの連続スペクトルとの結合の様子は系にかける磁場によって変化する．図1-28は磁場によるクーロン振動の変化の様子を3次元プロットしたものである．磁場の関数としての周期的変化は，リングを貫く磁束によるA B振動効果にほかならない．特徴的なことはクーロン振動の谷においてもA B振動が明瞭に観測されている点である．これはファノ共鳴によって局在状態が消失したことを示しており，この事情は近藤効果と似ている．クーロン振動を制御するゲート電圧によるA B振動の位相の変化を見ると，大部分のところで位相は固定しているが，クーロンピーク付近で位相のつなぎ替えが起こっているように見える．これらの点は今後の詳細な研究の対象である．

量子ドットやA Bリングに関しては既に多くの研究がある．量子ドットの位相コヒーレンスに関してはイスラエルのワイツマン研究所のグループが先駆的な研究を行っている．多体相互作用という観点からは，量子ドット中の離散準位とリード線の連続状態との多体相互作用による近藤効果に関して，多くの理論的予測をもとに東大物理・NTT・デルフト工科大学のグループがきれいな実験結果を出している．メゾスコピック系におけるコヒーレンスとデコヒーレンスの問題は将来の量子計算や量子情報通信に関する研究における基本的問題の一つであり，その観点から，プローブ配置によってデコヒーレンスが異なる

るという事実の指摘は重要な意味を持つものと考える。

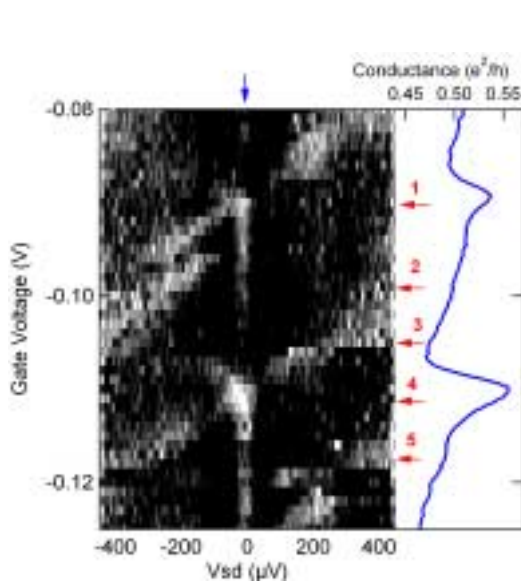


図 1-27：左図は量子ドットの中央ゲート電圧を変えながらソース・ドレインのI-V特性をとったデータのグレイスケール・プロット。クーロンダイヤモンドの中心のところに見られる白い線はファノ共鳴によるピークである。

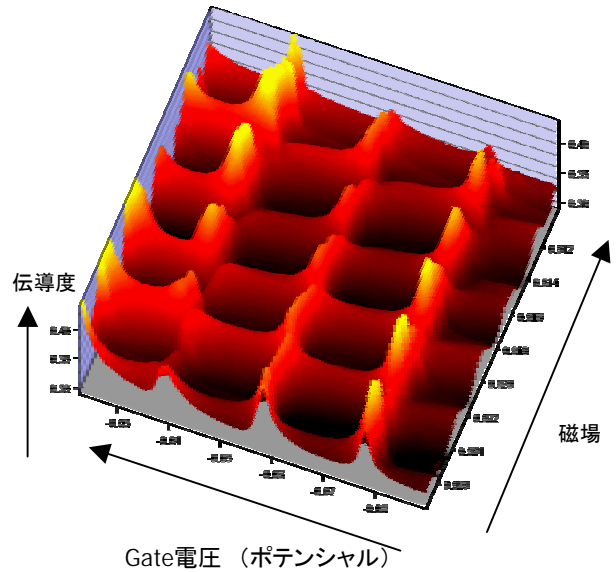


図 1-28：ファノ効果が起こる状況において、量子ドットの中央ゲート電圧と外部磁場の関数として系のコンダクタンスを3次元プロットしたもの。クーロン振動とA/B振動の位相の関係に注目される。

### 3.2 希薄磁性半導体の磁性と伝導

#### (1) 実施の内容

本CRESTプロジェクト開始の少し前から、東北大学の<sup>大野英男</sup>教授や東京工業大学の<sup>宗片比呂夫</sup>教授との共同研究によって、<sup>一族</sup>希薄磁性半導体の研究を進めていたが、本プロジェクト予算によって希薄磁性半導体専用のMBE装置(図2-1)が整備され、試料を自作できるようになって研究の幅および機動力が格段に広がった。また、SQUID磁化測定装置の導入により、磁性評価の効率が上がりそれを試料作製にフィードバックすることができた。伝導特性や磁性に関する測定は本グループ内で行い、分光実験についてはそれぞれの専門家の協力を仰いだ。軟X線分光は物性研究所の<sup>辛殖</sup>教授、赤外分光は東京大学生産技術研究所の<sup>平川一彦</sup>教授との共同研究として遂行した。

なお、<sup>一族</sup>希薄磁性半導体について光をプローブとする実験を進める計画も進めていたが、磁性イオンをドーブした試料はいずれも発光特性が極端に減殺されることが判明して、この点については計画の変更を余儀なくされた。



図2-1： - 族希薄磁性半導体専用のMBE装置

【研究担当】

研究担当者	役割
勝本 信吾, 家 泰弘	研究の全体統括
橋本 義昭	希薄磁性半導体のMBE成長, p n接合の特性
大岩 顕,	希薄磁性半導体の磁性および伝導, 光による制御
林 岳	磁性と伝導, 金属非金属転移の研究
(研究協力者) 辛 殖, 石渡 洋一,	軟X線分光実験
(研究協力者) 平川 一彦	赤外分光実験

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

A. 希薄磁性半導体の強磁性と巨大電流磁気効果

- 族化合物半導体の代表であるGaAsにMnなどの磁性イオンを導入する試みは以前から行われていたが, 結晶成長上の様々な困難があった。例えばGaAsの通常の成長条件でMnドーピングを試みると, MnAsの析出が起こる。低温エピタキシャル成長によってMn濃度7%程度までの(Ga,Mn)Asの成長が可能であることが大野らによって示された。(Ga,Mn)AsはMn濃度によって劇的な磁性および伝導の変化を示す。図2-2, 図2-3に示したように, Mn濃度が約3%を超えると系は絶縁体から金属に転移し, また強磁性を示すようになる。(Ga,Mn)As系の最高のキュリー点として, 現在のところ, Mn濃度4.5%付近で $T_c \approx 100K$  という値が得られている。Mn濃度が約5%を超えると系は再び絶縁体的なふるまいになり, キュリー点も低下する。Mn濃度7%以上では, NiAs構造のMnAs相の析出が見られる。金属的伝導すなわち遍歴正孔の出現が強磁性発現と深く結びついている。(Ga,Mn)Asにおける伝導が磁性と強く結合していることは, 異常ホール効果などに顕著に見られる。特に金属絶縁体の絶縁体側の試料では図2-4に見られるような, 巨大異常ホール効果, 巨大負



磁気抵抗効果が観測される。

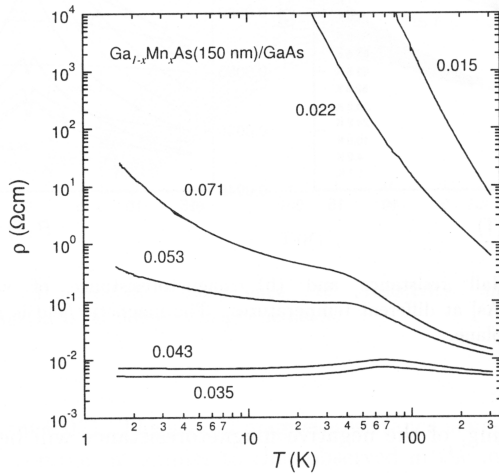


図 2-2 : Mn 濃度の異なる(Ga,Mn)As の電気抵抗の温度依存性。

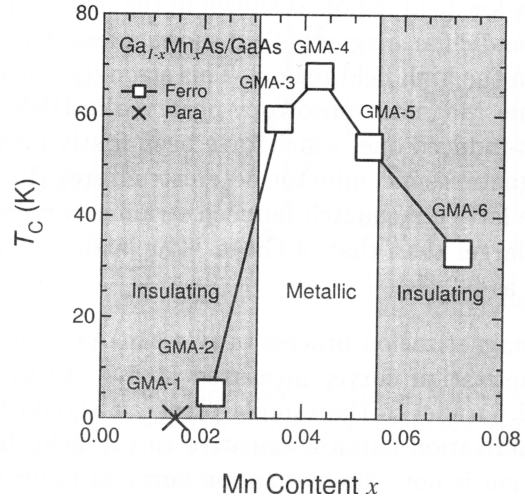


図 2-3 : (Ga,Mn)As 系の Mn 濃度による強磁性転移温度の変化。

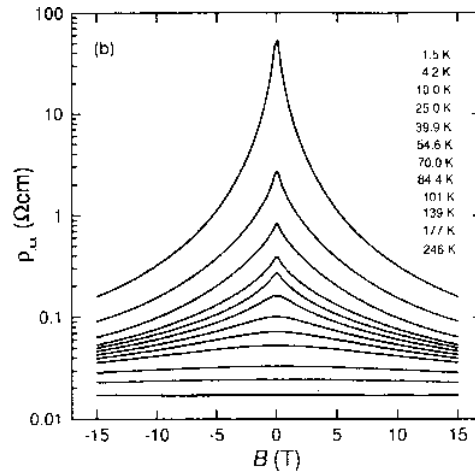
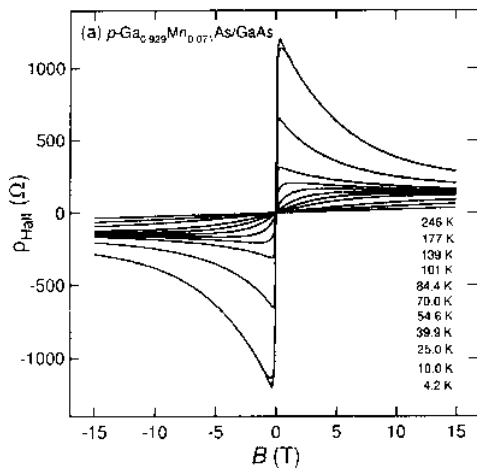


図 2-4 : (Ga,Mn)As の巨大異常ホール効果 (左図) と巨大負磁気抵抗(右図)。

## B. Ⅱ- 族希薄磁性半導体の低温熱処理効果

前述のごとく，Ⅱ- 族希薄磁性半導体(Ga,Mn)As および(In,Mn)As のエピタキシャル成長は通常のⅡ- 族半導体結晶条件よりもはるかに低温の非平衡条件で行われるため，膜質の制御が困難であるという問題点があった．特に高 Mn 濃度側の試料についてそれが著しく，これらの系の本質の解明を妨げていた．この問題に対して低温熱処理効果が有効であることが本研究の過程で発見された．すなわち低温エピタキシー成長後の試料に対して

200 ~ 300 程度の低温での熱処理を施すことによって、膜質を大幅に向上させ、かつ安定化できることが見出された。低温熱処理効果とX線回折等構造解析の研究から、(1)高 Mn 濃度試料における膜低下の原因が膜中に取り込まれた過剰 As と Mn が形成する複合欠陥にあり、(2)低温熱処理によって過剰 As が蒸発して欠陥が消失する、というメカニズムが明らかとなった。この低温熱処理効果を積極的に利用して同一の試料において伝導度や強磁性転移温度を系統的に変化させつつ物性測定を行う手法を確立した。

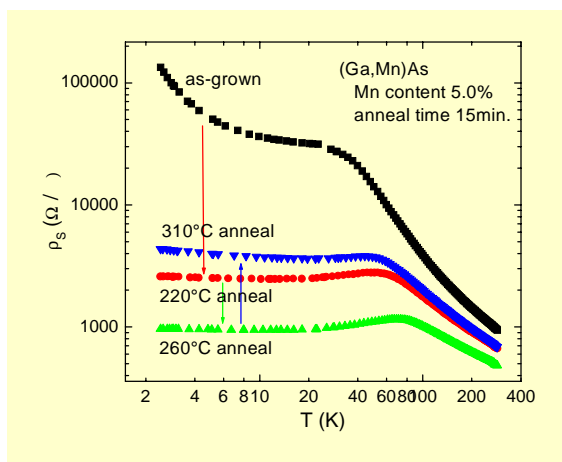


図 2-5：(Ga,Mn)As 薄膜(Mn 濃度 5%)，の as-grown 試料の抵抗のふるまいと，低温熱処理によるその変化。

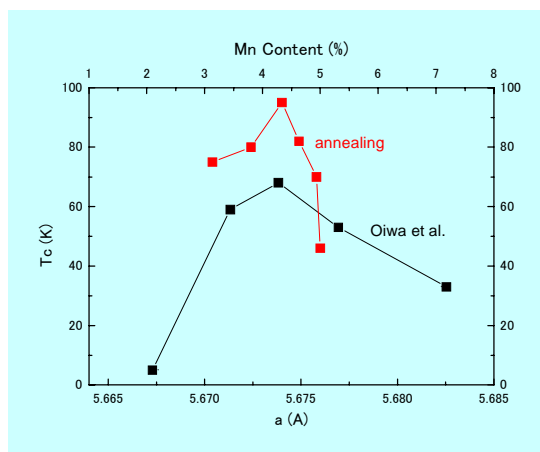


図 2-6：(Ga,Mn)As 薄膜(Mn 濃度 5%)試料の低温熱処理による強磁性転移温度の変化(赤のデータ)。黒で示したデータは Mn 濃度の異なる試料によるデータを示している。

### C. 希薄磁性半導体における電子状態と強磁性発現機構

- 族希薄磁性半導体の電子状態と強磁性発現機構を探るため、赤外分光および軟X線吸収分光測定を行った。赤外スペクトルで 200 meV 付近に見出される線幅の広い吸収ピークは、Mn の d 軌道と As の p 軌道の混成による正孔によるものと考えられるが、金属的伝導の見られる領域においても、この正孔は局在傾向の強いキャリアであることが窺える(図 2-7)。200 meV 付近のスペクトル強度と強磁性転移温度との間に相関が見られ、Mn 付近に局在した正孔が強磁性の発現に本質的な役割を果たしていることを示唆している。

Mn 2p 領域の軟X線吸収スペクトル(図 2-8)は、強磁性 Mn<sup>2+</sup>と常磁性 Mn<sup>2+</sup>(d<sup>5</sup>)の2つの成分からなり、低温熱処理によって後者の強度が減少する傾向が観測された。これは過剰 As の減少に伴って強磁性 Mn<sup>2+</sup>の割合が相対的に増加したことを示し、強磁性 Mn<sup>2+</sup>スペクトルの強度変化は強磁性転移温度の変化と良く相関している。このことは As 4p 正孔を介した運動交換的相互作用が Mn 3d スピン間の強磁性相互作用をもたらしていることを示唆する。

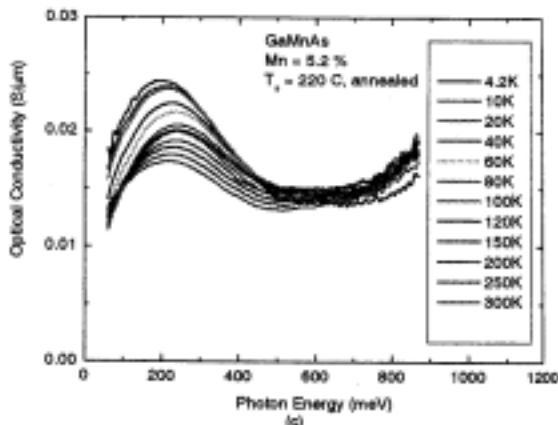


図 2-7: (Ga,Mn)As (Mn 濃度 5.2%) 試料の赤外伝導度スペクトル. 200meV 付近に見られる幅の広いピークは Mn 付近に局在する傾向の強い正孔の寄与を示している.

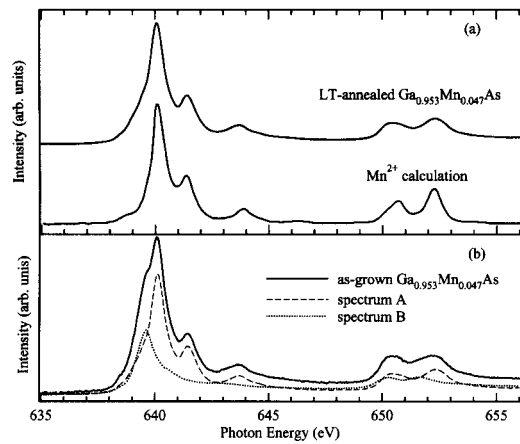


図 2-8: (Ga,Mn)As (Mn 濃度 4.7%) 試料の軟 X 線吸収スペクトル. 低温熱処理効果との相関から, 強磁性  $Mn^{2+}$  の存在が強磁性発現に主要な寄与をしていることを示している.

- 族希薄磁性半導体の研究は宗片・大野らわが国の研究者が (In,Mn)As によってその先鞭をつけた分野で, わが国の研究グループが世界をリードしている. (Ga,Mn)As における高い強磁性転移温度と特異な金属絶縁体転移が, 大野らとわれわれの共同研究で見出されて以来, この系の研究は世界的に極めて盛んになった. 海外では I M E C (ベルギー), カリフォルニア工科大学 (米), ポーランド科学アカデミー, などでは競って応用研究, 基礎研究を行っている. ただし, 現在のところ, - 族系の高品質試料作製が可能なのは, 国内の東北大通研, 東大工学部, そして当グループの 3 箇所である. 前二者は, 超構造デバイスの作製に力を注いでおり, 当グループでは, 低温強磁場を用いた測定を中心として基礎物性の解明に力を入れている. このような状況の中で, われわれが見出した低温アニール効果は, これまでの実験のやり方を大きく前進させるものと期待される.

#### D. 希薄磁性半導体における金属絶縁体転移

(Ga,Mn)As 系では, Mn 濃度の増加とともに系が絶縁体から金属に転移し, さらに高濃度側で再び絶縁体に転移する特異なふるまいが見られる. 金属絶縁体転移近傍では巨大な負の磁気抵抗が見られることから, 同一試料において外部磁場によって非金属 金属転移を制御できる, というユニークな系が得られる. 低温熱処理を利用して金属非金属転移直前に試料をチューニングし, 磁場誘起非金属金属転移を有限温度 2 パラメータ・スケーリング理論によって解析した. Mn 濃度低濃度側での金属絶縁体転移 (MIT-1) と高濃度側での転移 (MIT-2) の性質の違いを明らかにすることは, (Ga,Mn)As の磁性の機構を知る上で重要であるばかりでなく, 高濃度ドーパ半導体の金属非金属転移で従来から大きな問題となっている臨界指数の問題に重要なヒントを与えるものと考え研究を進めた.

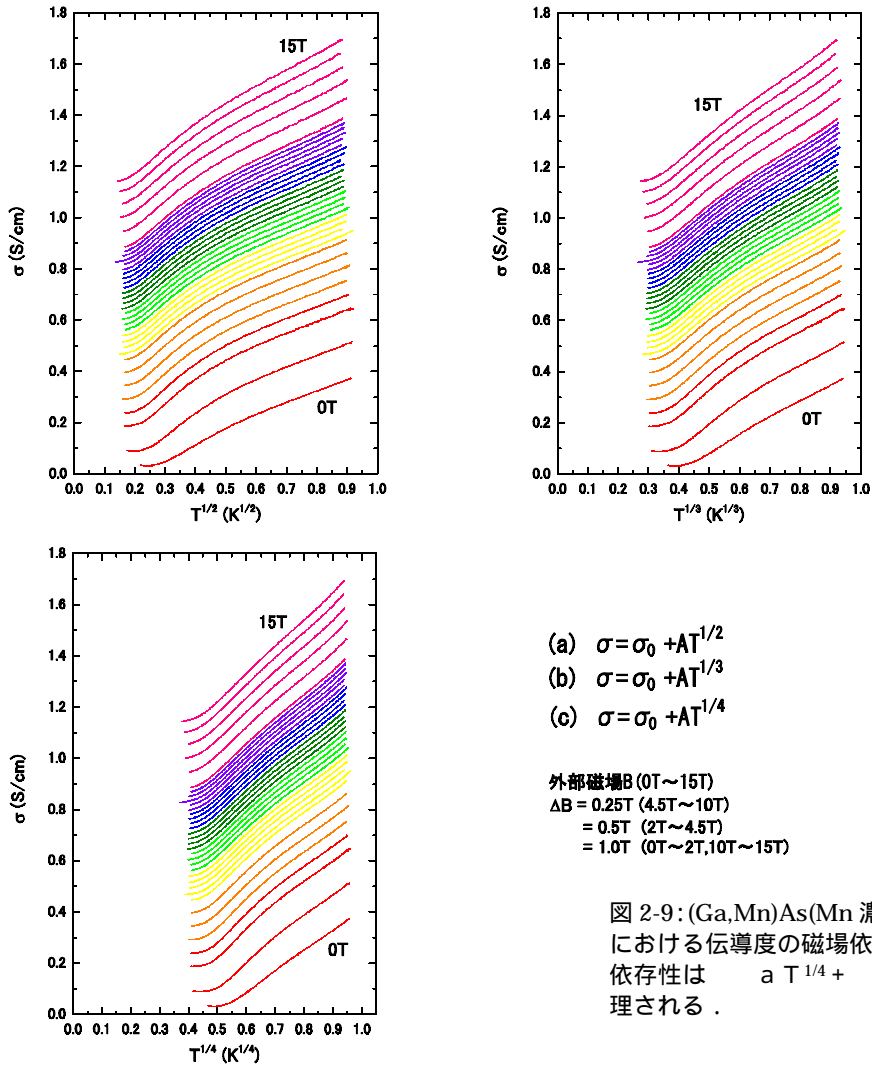


図 2-9: (Ga,Mn)As(Mn 濃度 5 %) 試料の低温における伝導度の磁場依存性 . 伝導度の温度依存性は  $\sigma = a T^{1/4} + \sigma_0$  という式で良く整理される .

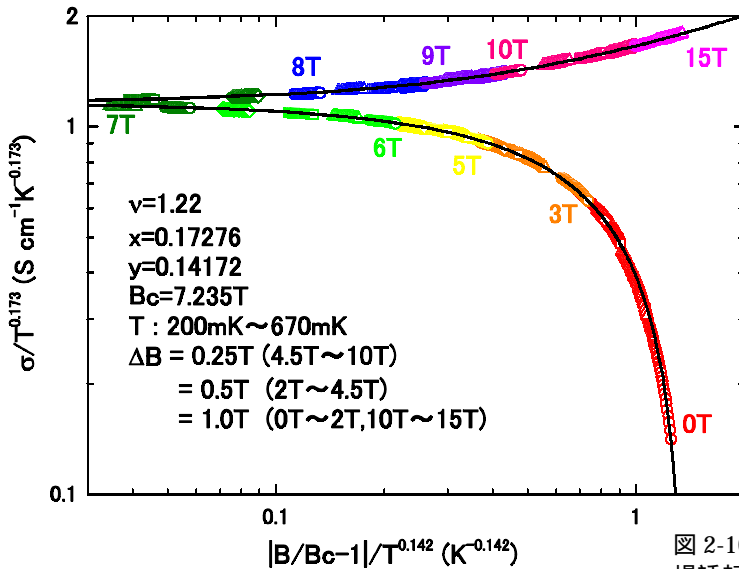


図 2-10: (Ga,Mn)As(Mn 濃度 5 %) 試料の磁場誘起金属非金属転移の 2 パラメーター・スケーリング解析 . 高 Mn 濃度側の MIT2 はスケーリング解析が良く成立する .

M I T - 1 では 2 パラメータ・スケーリングにのるパラメータ領域がかなり狭いのに対して，M I T - 2 では実験可能な磁場範囲(15T 以下)全域で 2 パラメータ・スケーリングでフィットできることを見出した．このことは，M I T - 1 と強磁性の発現が，一方が他方の原因になるという単純な因果関係で結ばれるものではなく，機構的に密接に関係しており，これは，もっとも単純な R K K Y 型強磁性を否定するということである．もう一つは，M I T - 1 のように電子相関が重要な働きを担う M I T においては，2 パラメータスケーリングは何らかの変更を求められる，ということで，これはまた転移点ぎりぎり近傍まで相関が重要になる補償の極めて少ない不純物半導体の場合，特異な臨界指数が現れるという可能性も示唆している．

### 3.3 表面ナノ構造磁性体の形成と磁性

#### (1) 実施の内容

本研究では，超高真空中の固体清浄表面上に単結晶超薄膜金属やナノ構造金属磁性体を作製し，それらの磁性を調べた．清浄表面に形成されたナノ構造磁性体の特徴的な磁性をその場(in situ)測定を行うため，図3-1に示したような温度可変超高真空磁気光学効果測定装置を新たに設計し，超高真空部品や光学素子を組み合わせて組み立てた．本装置は，基板となる単結晶金属表面の清浄化，ガス吸着，熱処理，磁性金属の蒸着など微細構造試料作製に必要な一連の操作を行った後に，超高真空中のまま磁気ヒステリシスのその場測定が可能な設計となっている．また，表面自己形成ナノ構造金属磁性体の探索および形成条件の解明のために，既設の超高真空装置に試料作製のための諸装置と表面ナノ構造評価のための走査トンネル顕微鏡を取り付けたものを製作した(図3-2)．

本研究で開発した温度可変超高真空磁気光学効果測定装置は，様々な系の表面磁性研究に強力な実験手段を提供する．表面と磁性の関わりの特徴的な例として，強磁性金属表面に異種元素を吸着することによる強磁性の変化という問題がある．例えばコバルト表面に異種金属やガスを吸着することによる磁性の変化が報告されている．本研究では，大きな表面電子状態変化をもたらすことが知られているセシウム吸着がコバルトの磁性に及ぼす効果について研究を行った．

また，典型的磁性体であるマグネタイトの電子状態を調べるため，Pt 基板上に単結晶薄膜を作製しその場で光電子分光を行った．実験は高エネルギー加速器研究機構物質構造研究所フォトンファクトリーのビームライン B L 1 9 A に設置されている光電子分光装置を利用して行った．

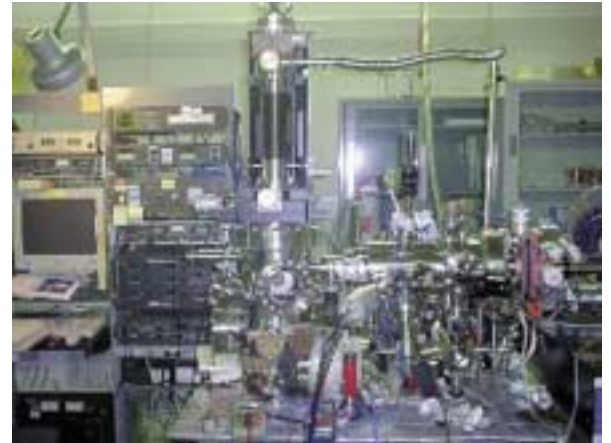
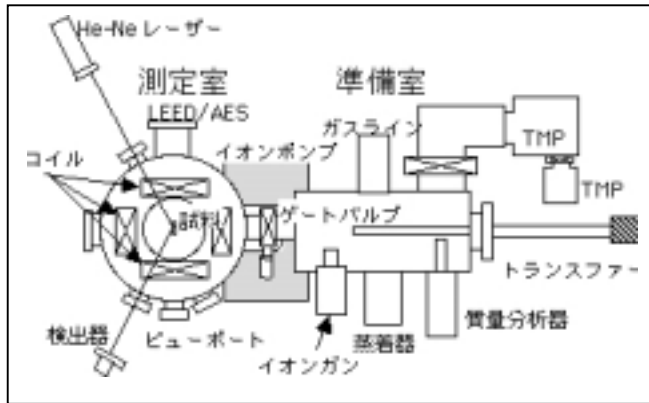


図 3-1：温度可変超高真空磁気光学効果測定装置の概略図と実際の装置



図3-2：超高真空走査トンネル顕微鏡装置



図3-3：マグネタイトの光電子分光に用いられた装置．高エネルギー加速器研究機構物質構造研究所フォトンファクトリーのビームライン B L 1 9 A に設置されている．

【研究担当】

研究担当者	役割
小森文夫	研究の全体統括
服部賢，山田正理	温度可変超高真空カー効果測定装置の設計と組み立て
飯盛拓嗣， Yong Quian Cai	温度可変超高真空カー効果真空装置の組み立てとそれを用いた実験
Ki-Dong Lee，	



Ming-Chun Xu , 河村紀一	温度可変超高真空カー効果真空装置を用いた実験
中辻寛, 植田正輝, 櫛田桂一, 大野真也	ナノ構造磁性体のSTM観察
小森文夫, Yong Quian Cai, 中辻寛, 山田正理, 飯盛拓嗣, 大野真也	マグネタイト試料作製およびスピン分解光電子分光実験

## (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

### A. 強磁性体ナノドット配列の形成機構

本研究の基礎として、窒素吸着Cu(001)面にNi微粒子が正方格子に並ぶことが、物性研究所田中虔一教授のグループによって少し前に見出されていた。しかしながら、Niナノドット配列の場合、自発磁化をもつような平均膜厚ではすべての微粒子がつながってしまって、一様な薄膜との区別が失われてしまうこともわかっていた。そこで本研究では、2原子層以上の高さを持つ微粒子が自発磁気モーメントをもつと期待されるCoを用いて、ナノドット配列の作製と磁性の研究を行った。また、強磁性体の種類による個性を調べる目的で、Feナノドットの研究も行った。

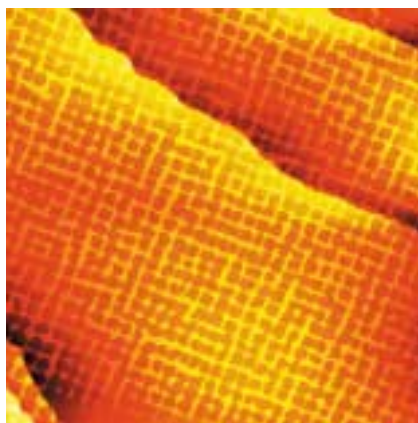
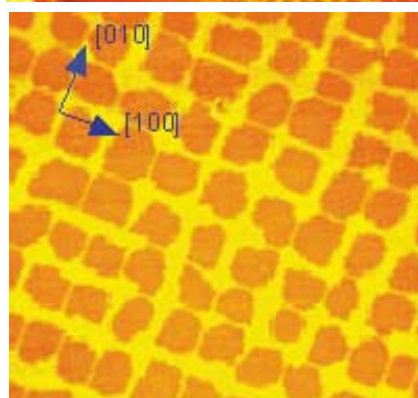


図3-4：(左図)窒素吸着Cu(001)面のSTM像。明るい格子が銅清浄表面である。

(左下図)その拡大図。

(右下図)2原子層厚さのCoドット配列のSTM像。



窒素イオンをCu(001)面に照射しそれをアニールする方法で、図3-4の左図のような清浄表面と窒素吸着表面からなるナノメートルスケールの正方格子パターンを作製することができる。格子の周期は約7nmである。この表面の上にCoあるいはFeを蒸着すると、図3-4の右図のような2原子層の厚さのナノ磁性ドット配列を形成することができる。成長の初期には、いずれも窒素吸着面ではなくCu清浄表面に選択的に第一原子層が成長するが、細かく見ると図3-5のように少し異なることがわかった。すなわち、FeではCu細線格子の格子点に選択的に成長するが、CoではCu細線上に一樣に成長する。細線格子点では銅清浄表面のなかで格子歪が最も少ないので、格子歪がFeの成長選択性を決めていると考えられる。

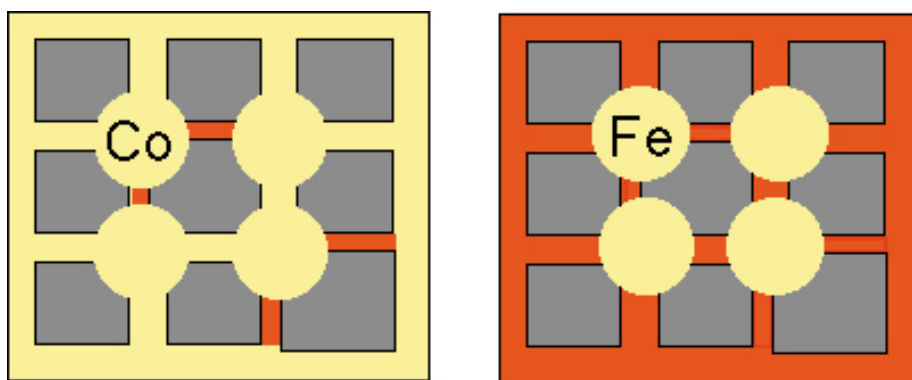


図3-5：窒素吸着Cu(001)面にCoを蒸着すると、左の図のようにCu清浄表面のうち細い細線を除いた場所でCoが成長する。Feでは右図のように、Cu清浄表面の格子点で成長する。

Fe蒸着初期の表面を図3-6のようにSTMでさらに詳しく調べたところ、(1)最初にFe原子と基板Cu原子の置換がおこる、(2)その置換した場所にFeの成長核ができる、(3)成長核は清浄表面に均一にできる、(4)Feの場合には、核からの成長速度が細線格子点で速いことなどがわかった。蒸着量が1原子層近くになると薄膜の構造には違いがなくなり、第2原子層目はどちらもCu細線格子の格子点に選択的に成長する。このように、蒸着物質によってナノドット形成の様子はその詳細が異なっている。これらをうまく利用することによって特徴的な構造をもつナノドット配列の形成が可能になると考えられる。

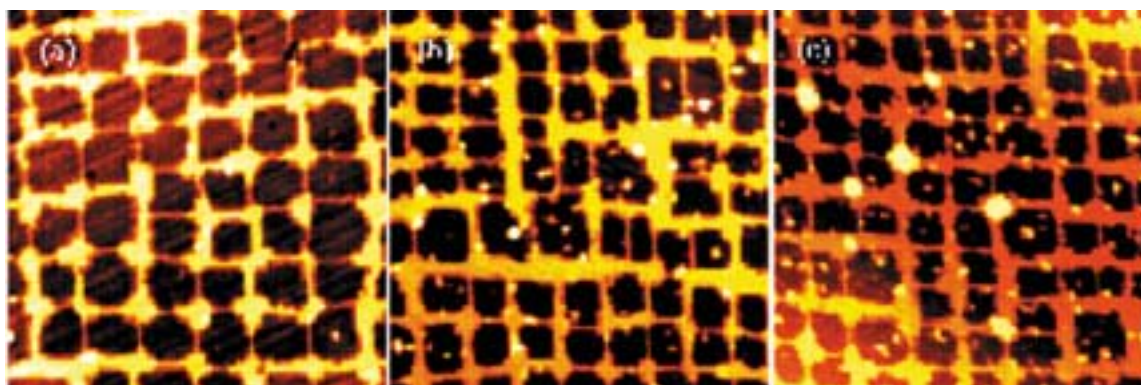


図3-6：窒素吸着表面にFeを蒸着した時のSTM像。Feの平均膜厚は (a)0.003, (b)0.015, (c)0.03 M



Lである。

## B. 強磁性体ナノドット配列の磁性

ナノドット配列の磁性を磁気光学効果によってin-situに測定した。図3-7はCoナノドット配列の測定結果である。

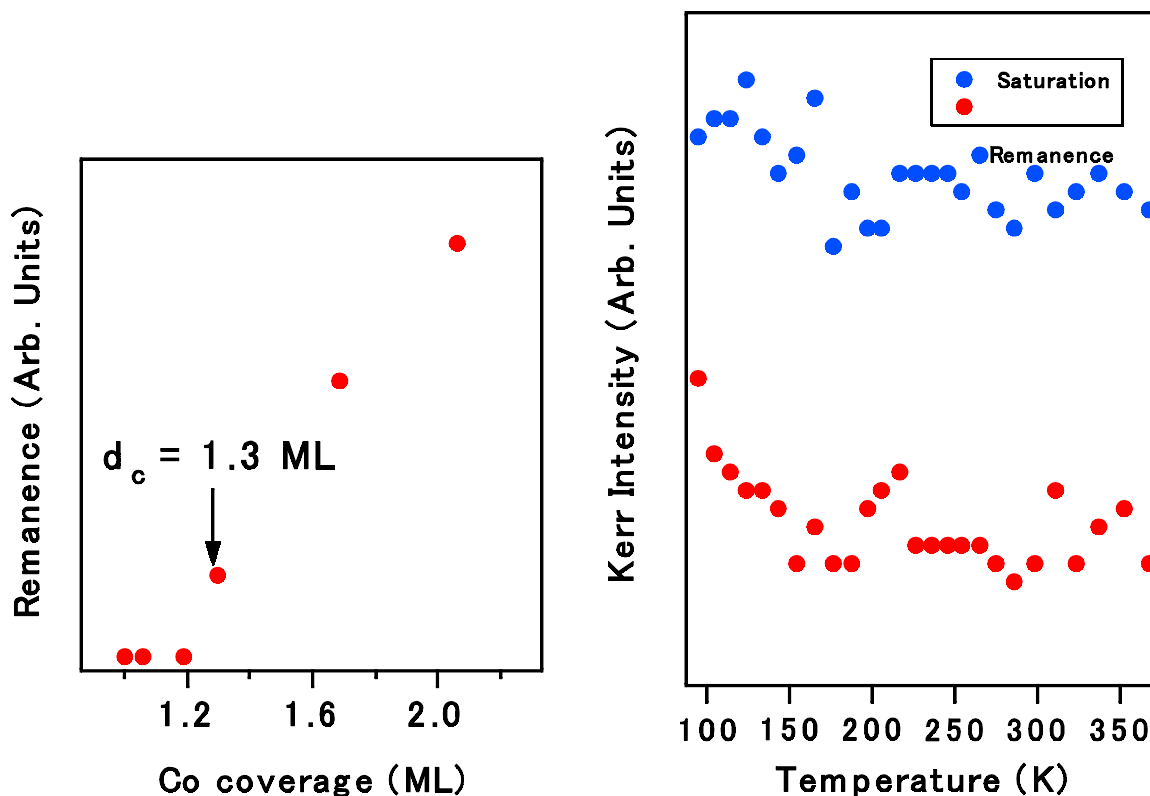


図3-7: (左図)磁気光学効果によって求めた磁気履歴から決定した残留磁化(相対値)のCo蒸着量による変化。(右図)平均膜厚1.9原子層のCoナノドット配列の磁気カー効果の温度依存性。

磁気カー効果によってドット配列の磁気ヒステリシスを測定した結果、(1)格子点で成長した2原子層高さのCoドットは、超常磁性を示し、隣のドットとの間隔が狭くなったところで強磁性が出現すること、(2)3原子層の領域と1原子層領域が共存する系では、強磁性転移温度は400K以上であるが、温度を下げるにしたがって、150K付近より再び磁化が増大する現象が観測された。前者は、図3-8(A)の模式図に示したように、2原子層高さのドット間の磁気相互作用がそれらのある単原子層のCoによって媒介された結果である。後者は、図3-8(B)でわかるように、2~3原子層の厚さのCo微粒子からの磁気相互作用が窒素吸着面上の単原子層のCoに低温で磁化を生じさせていると解釈できる。また、軟X線磁気円二色性測定を行なったところ、厚いCo膜と比べて、ドット配列では軌道磁気モーメントが相対的に大きくなっていることがわかった。これは、この系の磁気異方性を理解し、制御するために有用な情報である。

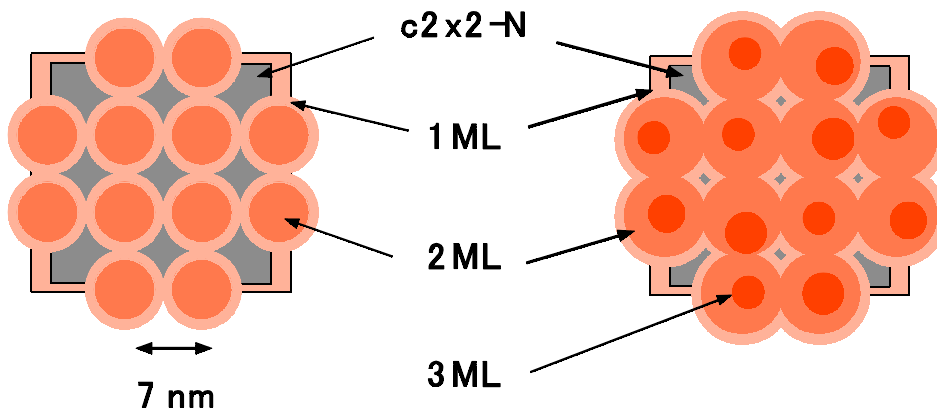


図3-8：平均膜厚1.3原子層(A)および1.9原子層(B)のコバルトドット配列の模式図。

窒素吸着Cu(001)など特異な表面構造に関する研究は最近ヨーロッパで盛んになり、原子配列構造、ナノ構造形成過程、ナノ構造形成のためのテンプレートとしての研究が進められている。表面の自己形成パターンをナノ構造作製に利用する試みはいくつかなされている。その中で、本研究で取り上げた窒素吸着銅表面以外では、Au(111)清浄表面を利用した研究が国内外で行なわれている。また、ガス分子や金属元素の表面吸着による磁性制御は、磁性制御の有力な方法のひとつとして、欧米で研究されている。

磁性ナノ構造の作成とその磁性の発現機構の解明は、基礎科学の研究対象として重要である。本研究で取り上げた窒素吸着Cu(001)表面においても、その形成機構の解明は端緒についたばかりであり、表面歪みとナノパターン形成や表面における原子のダイナミクスに基づくミクロな結晶成長機構の研究を行っていかなければならない。ナノメートルスケールの磁性研究は、最近になってスピン偏極走査プローブ顕微鏡が研究に使用されるようになり、また、最新の光学的手段を用いたマクロな磁性測定法も発達しているので、さらに詳しい研究が進展すると予想される。これらの中から、新しい現象や有用な機能が見出され応用につながると期待できる。本研究で対象とした磁性ナノドット配列は、高密度磁気記憶媒体への応用が考えられているが、その実現のためには超常磁性をブロックするための磁気異方性の増大など物性の改良と、大気中に取り出す方法など利用上の工夫が必要である。各種材料を用いた今後の応用研究によりこれを目指した研究が進展すると考えられ、我々のグループでも応用研究者の協力を得て研究を進めている。

### C. Cs吸着構造と吸着によるCo薄膜磁性の変化

Cu(001)面上のfcc-Co超薄膜にCsを吸着させると、Csはヘキサゴナル構造に配列する。表面吸着Csがこのような秩序構造をもつと同時に、図3-9に示すように磁化過程が2段階となった。これは、表面の原子高さのステップに起因する磁気異方性と保磁力が変化した結果である。これにより、吸着秩序構造の形成と磁性の変化の関係が明らかになった。

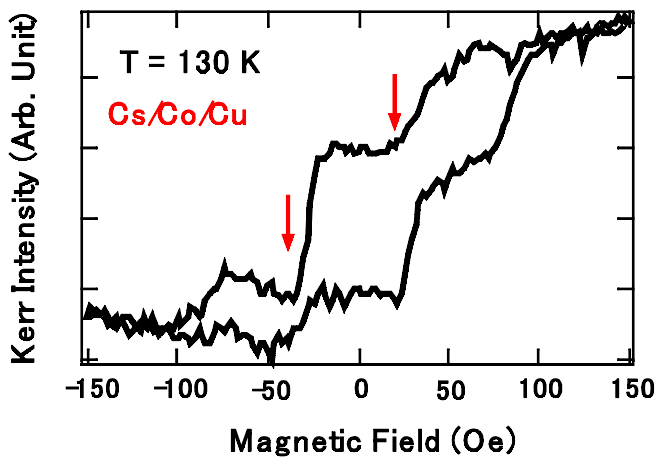


図3-9：Cs吸着fcc-Co超薄膜に現れた2段階の磁化過程

#### D. 清浄表面上のマグネタイト薄膜の電子状態

バルクの単結晶を用いた酸化物磁性体の研究は最近ますます盛んになっている。しかし、その電子状態を調べるために光電子分光を行なおうとしても、表面付近の結晶構造乱れのためにその物質固有の性質を明らかにすることが困難な場合がある。また、絶縁体酸化物では、光電子分光測定そのものがチャージアップのために困難である。そこで、光電子分光用の試料として、清浄表面上にエピタキシャルに作成し、表面乱れが少ない単結晶酸化物薄膜が有望視されている。我々は、マグネタイト低温相の電子状態を調べるために、図3-10に示した方法でPt(111)面上に薄膜を作成し、これまでバルク単結晶では困難であった低温スピン分解光電子分光を行った。

試料は研究室のカー効果超高真空容器内で、Feの蒸着と酸化を繰り返すことによって作製し、その構造と組成は低速電子回折やオージェ電子分光を用いて確認した。また、カー効果測定装置を用いて強磁性ヒステリシスを測定し、最適な試料作製条件を求めた。その後、高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・フォトンファクトリーのBL19Aビームラインにおいて、同じ試料作製条件でマグネタイト薄膜を作製し、スピン分解光電子分光測定を行った。

図3-11に、マグネタイトのスピン分解光電子分光測定結果を示す。室温ではフェルミ・エネルギー直下に金属的な少数スピンバンドが観測される。フェルヴェイ(Verwey)転移以下である100Kでの測定ではこのバンドの状態密度が変化している。すなわち、金属絶縁体転移に対応して、フェルミ・エネルギー付近では状態密度は小さくなり、より深い1eVまでの電子状態密度は増大する。一方、フェルミ・エネルギーよりも2eV以下の電子状態は、室温と100Kで変化がない。言い換えれば、フェルヴェイ転移に伴う電子状態の変化は、フェルミ・エネルギー近傍のみに限定されていることになる。

金属清浄表面上の単結晶酸化物作製はドイツや米国で盛んであるが、国内ではあまり例

がない．特に，Pt(111)面上のマグネタイト作製およびその電子状態と磁性の研究は主としてドイツで行われてきた．このような薄膜での研究により，従来多くの測定結果がありながら，理解が困難であった低温相の物性が解明されるであろう．マグネタイトに限らず，絶縁相における強相関酸化物の電子物性や酸化物上の触媒作用の研究に対しても，酸化物薄膜を用いた電子分光測定は有用であり，今後薄膜を用いた実験により，これらの物質の電子状態の理解が深まることが期待できる．また，現状のスピ分解光電子分光測定は，詳細な物性を議論するためには，まだ分解能が不足している．高輝度軌道放射光の利用や電子分光器の改良により，今後この方法の適用できる物質も増えてくると思われる．酸化物の応用はデバイスや触媒など幅広いので，これらの基礎研究の成果が応用にも役立つであろう．

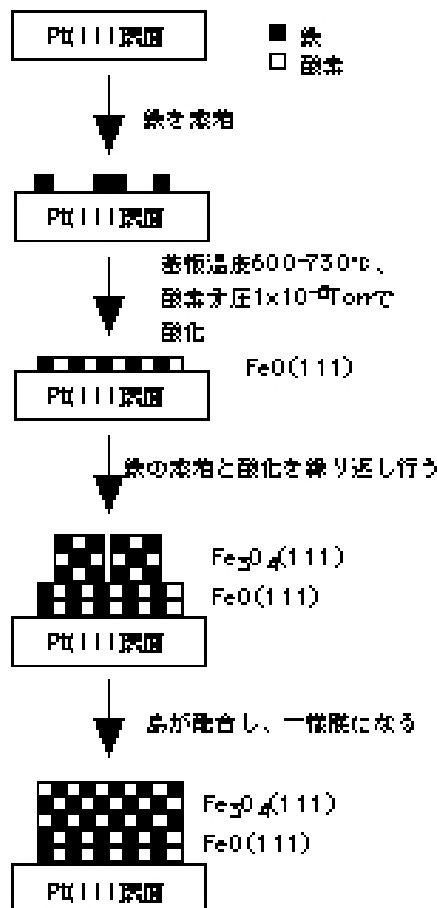


図3-10：マグネタイト単結晶薄膜の作製手順．

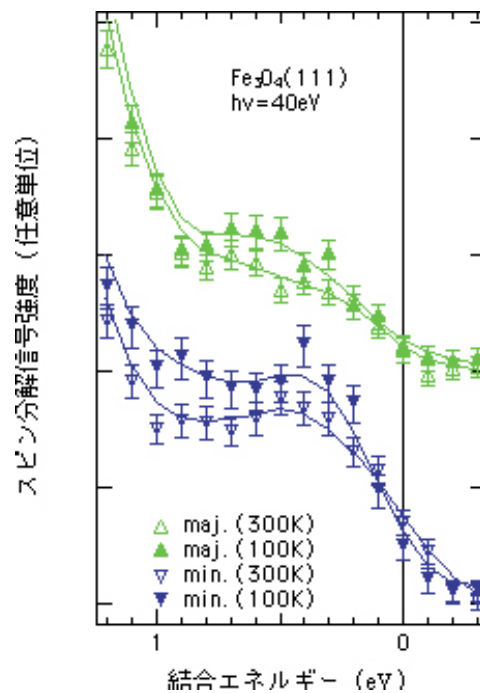


図 3-11：マグネタイト薄膜のスピ分解光電子分光スペクトル

### 3.4 メゾスコピック磁性体におけるスピン依存伝導

#### (1) 実施の内容

金属磁性体細線におけるスピン依存伝導現象を調べる研究を2つの異なるアプローチで行った。八木グループでは電子線描画微細加工によって金属細線およびA Bリング構造を作製し、その低温における伝導現象を調べた。小森グループでは、低温超高真空STM装置を用いて、究極の細線である原子ワイヤーの伝導を調べた。ナノワイヤーにおける伝導度量子化に関しては、貴金属やアルカリ金属について多くの実験が行われてきた。磁性原子ナノワイヤーについても最近いくつかの研究が行われているが、伝導度量子化に関しては研究グループごとに異なる結果が報告されている。本研究では低温STM装置を用いることにより準静的な条件で再現性のある測定を行うことを主眼として実験を遂行した。

#### 【研究担当】

小森 文夫, 中辻 寛	超高真空低温STMを用いた磁性金属細線の実験
八木隆多, 先田 成伸	微細加工による金属磁性細線の作製と低温量子伝導測定

#### (2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

##### A. 磁性ナノワイヤーの量子化伝導

原子サイズの金属ワイヤーの電気伝導は、細線部の伝導チャンネルの数と各々のチャンネルの透過確率によって決定される。磁性体原子ワイヤーでは、外部磁場によってこれらを制御できると期待されている。しかしながら、これまでの磁性体原子ワイヤーでのいくつかの実験結果は互いに矛盾しており、磁性体原子ワイヤー独特の性質が何であるかは明らかになっていなかった。本研究では、極低温超高真空中で安定な強磁性細線を作製しその電気伝導を調べた。実験は超高真空走査トンネル顕微鏡を改良して用い、試料には超高真空中で蒸着したFeの薄膜を用いた。また、測定は4.2 Kで行った。この清浄なFe薄膜表面に探針を接触させた後、探針を表面から引き離すと、図4-1のように、過渡的にFeの原子ワイヤーが形成される。このワイヤーは長時間安定であり、細線が破断しない範囲で引き伸ばしたり縮めたりしながら、伝導度測定を行うことが可能である。磁場掃引中の電気伝導度の変化も調べた。また、比較のためNi細線の電気伝導も調べた。

液体ヘリウム温度での実験の結果、強磁性体で期待されるように、電気伝導度の量子化単位が非磁性金属の場合の $2e^2/h$ と比べて約半分になっていることが観測された。図4-2は電気伝導度の跳びの大きさのヒストグラムである。また、数多くの測定のなかには、図4-3に示したように、 $e^2/h$ の電気伝導度の跳びが細線を引き伸ばしたり縮めたりする際にヒステリシスをもって再現する例が観測された。このふるまいは、原子の位置にヒステリシスがあるか、あるいは磁性状態にヒステリシスがあるかのどちらかを反映していると考えられる。第一原理計算によると、Fe原子間距離を変化させるとスピン状態も変化する

ことがわかっている．しかし，実験で行われているように原子位置を自由に変化させて構造最適化を行う計算は困難であり，実験との比較はまだ不十分である．また，外部磁場を掃引して電気伝導を測定したところ，1 k G程度までの範囲で電気伝導度の変化は数%以下であった．本系では伝導チャンネルの数と各々のチャンネルの透過確率はこの程度の磁場では変化しないと考えられる．Niを用いた測定でも，同様な結果が得られ，この現象は強磁性金属に一般的なものであることがわかった．

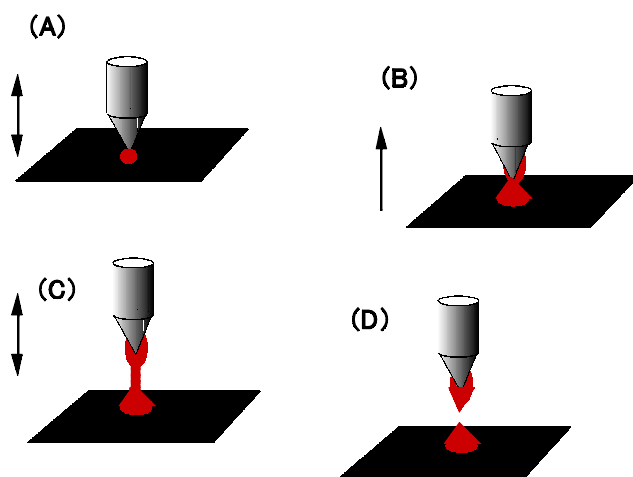


図4-1: S T Mの探針をF e表面に接触させた後にゆっくり表面から引き離すと，(C)のように，探針と表面の間に原子レベルのF e細線が形成される．

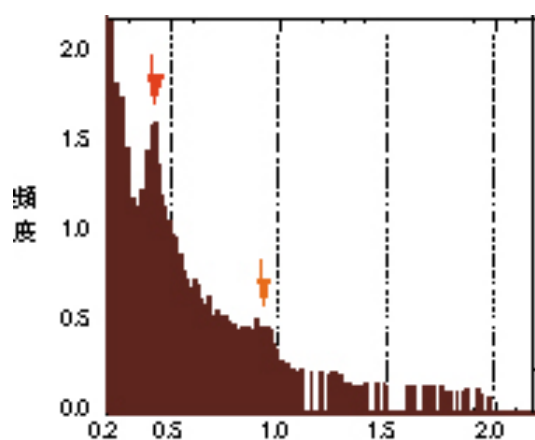


図 4-2 : コンダクタンスの跳びの大きさのヒストグラム

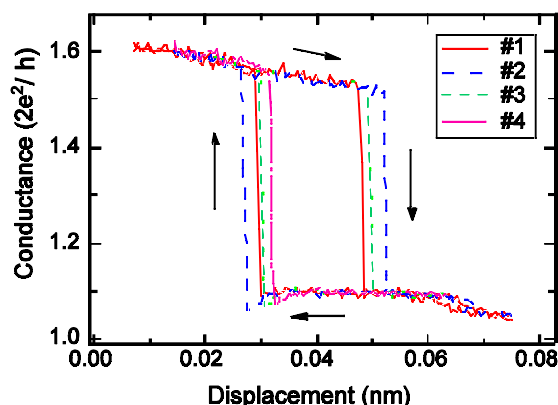


図 4-3 : S T M探針と試料表面の間の距離の変位に対して可逆的に起こるF e原子細線の電気伝導変化．

原子サイズの金属ワイヤーの電気伝導の研究は，主としてヨーロッパ各国の研究者が行ってきた．国内では，数グループがこの研究を行っている．金属磁性体を用いた研究も国内外で行われているが，その多くはリレー接点などを用いた過渡的な方法である．これまで，超高真空中での測定はデンマークのグループが室温で行った例があるのみであり，極低温での実験はヨーロッパの1，2のグループが接合破壊法で行っているが，超高真空中極低温走査トンネル顕微鏡を用いた研究は他にない．

ナノスケールの磁性と伝導との関係については今後さらに詳しく調べる必要がある．金属の種類を変えたり細線表面の吸着による制御などの実験や第一原理計算に基づく理論により，この問題についての研究が進展するだろう．本研究で明らかとなった効果は室温でも観測される現象であり，磁場や変位による抵抗変化のデバイスへの応用も期待できる．そのためには，高度の機械的安定性を維持する必要がある．

### B. 磁性金属細線における磁気抵抗ゆらぎ

微細加工によって図4-4のようなA Bリング構造をAuおよびNiで作製し，その低温量子伝導を調べた．非磁性のAuリングではコンダクタンスゆらぎに重畳したA B振動効果が観測されるが，磁性体であるNiのリングではゆらぎは観測されるもののA B振動は観測されていない．

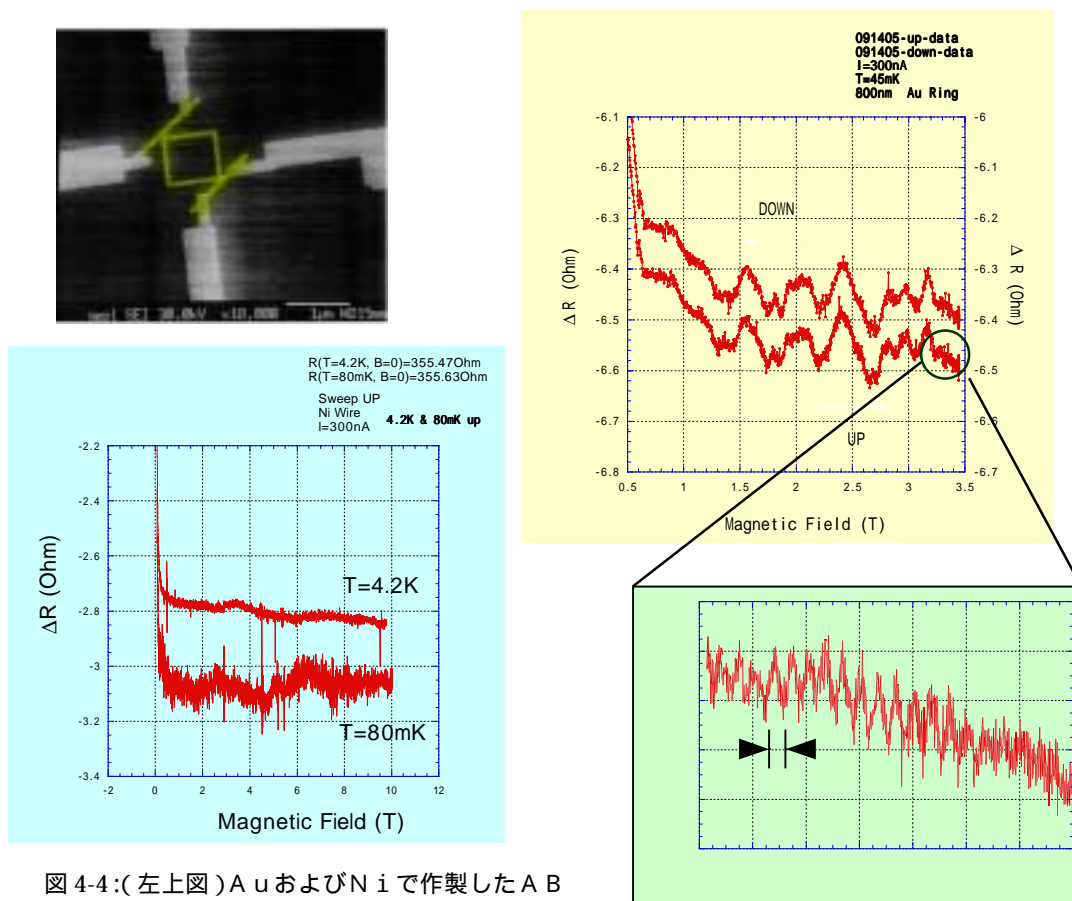


図 4-4: (左上図) Au および Ni で作製した A B リング構造 . (右上図) Au リングの磁気抵抗 . 伝導度ゆらぎに重畳して右下図のような A B 振動が見える . (左下図) Ni リングの磁気抵抗 .



### 3.5 メゾスコピック超伝導体と磁性

#### (1) 実施の内容

電子線描画と真空蒸着（図5-1）によって作製した微小超伝導体の磁場中でのふるまい（磁束状態）を調べた。超伝導単電子トランジスタの特性を利用して、微小超伝導リングおよび単連結の超伝導体の磁場応答から、磁束量子1本ずつの出入りを高感度で検出する手法を開発した。この方法では微小超伝導体に測定用の電極が付いた構造となることが避けられないことから、これと相補的な情報を得る目的で孤立した微小超伝導体を低温STMによって調べることも行った。本プロジェクト予算で購入した、磁場中で動作する低温STMがこの研究に活用された。

微細加工とイオンビーム・スパッター蒸着によって作製した超伝導ネットワークの超伝導転移、特に一様磁場でなくネットワークの単位胞ごとに符号が変わるような空間変調磁場（チェッカーボード磁場）中での超伝導転移のふるまいを調べ、理論モデルとの比較を行った。

既設の超高真空極低温STM装置を、局所STSスペクトル測定ができるように改良し（図5-2）、これを用いてNbSe<sub>2</sub>清浄表面の電荷密度波および超伝導ギャップスペクトルの局所測定を行った。さらにこの表面にFe微粒子を配した系について超伝導の対破壊効果を局所スペクトルによって調べた。

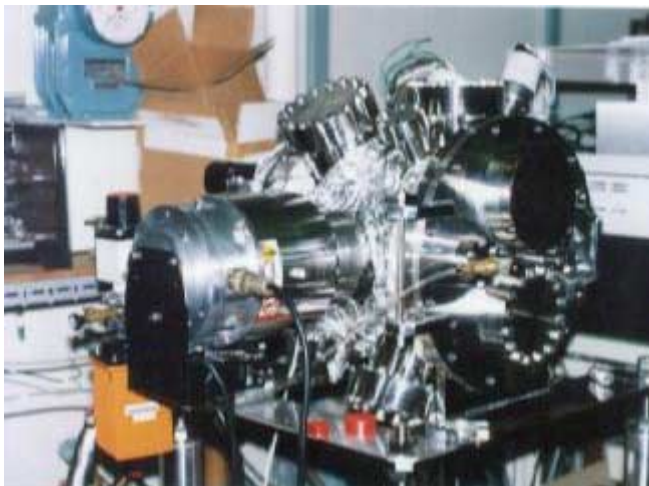


図 5-1：高真空蒸着（イオンビームスパッター）装置



図 5-2：極低温走査トンネル顕微鏡



【研究担当】

勝本 信吾, 木村 充, 藤木 貴子, 佐藤 秀樹, Maxim Zalalutudinov, 藤岡 博幸	メゾスコピック超伝導体の磁束状態の研究
家 泰弘, 伊藤 優, 安藤 正人, 山崎 順稔	チェッカーボード磁場中の超伝導ネットワーク
小森 文夫, 服部 賢, 新井 紳太郎	低温超高真空 S T M を用いた超伝導の局所スペクトロス コピー

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

A. メゾスコピック超伝導体の磁束状態

サイズがコヒーレンス長と同程度の微小超伝導体においては超伝導のマクロ波動関数に対して閉じ込めの効果が働く。このような系において、磁束量子（渦糸）がどのような形態で現れるかは、極めて興味深い問題である。この問題について、超伝導単電子トランジスタ（SSET）を用いた測定を行った。ドーナツ状のクーロン島、コヒーレンス長程度のクーロン島などを持つ SSET を作製し、ソース・ドレイン電流の磁場応答を測定した。その結果、微小超伝導体に磁束量子が 1 本ずつ出入りする様子、すなわちマクロ波動関数が磁束量子状態間を遷移する様子を明瞭に捉えることができた。図 5-3 は微小な超伝導リングと単連結超伝導体に対して外部磁場を掃引したときの準安定状態間の遷移をとらえたものである。

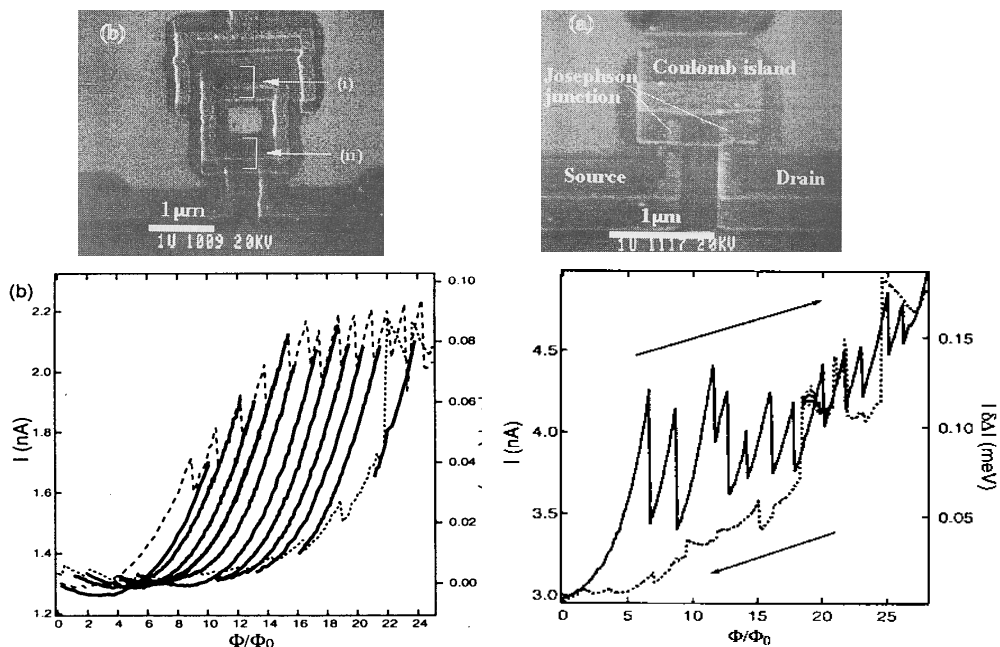


図 5-3：超伝導単電子トランジスタ（SSET）のソース・ドレイン電流に外部磁場に対する変化。不連続な跳びは磁束量子 1 本ずつの出入りを反映する。外部磁場の掃引を狭い範囲に限定すると、一つの準安定状態の中に留まる。準安定状態の分布は超伝導リング(左図)の場合にはほぼ等間隔の規則的なふるまいを示すのに対して、単連結超伝導体では不規則な分布を示す。これはメゾスコピック伝導体の場合の磁気指紋に似たふるまいである。

一方、北海道大学明楽浩史との理論的な共同研究により、渦糸系がアブリコソフ格子を形成しているのか巨大渦糸を形成しているのかを明確に区別することはこの手法では難しいことも明らかになった。そこで、この系を、空間分解能を持つプローブで調べるために、低温走査トンネル顕微鏡(LT-SSTM)を導入し、マクロ波動関数振幅の空間分布のトンネルスペクトル測定を試みた。微小超伝導体としては、種々の超伝導体を試した結果Inを選択した。図5-4のようなIn微小円盤を2Kまで冷却し、円盤中心でのギャップスペクトルを外部垂直磁場の関数として測定したところ、臨界磁場以下のある磁場においてマクロ波動関数の振幅が大きなディップ構造をとることがわかった。このふるまいは、この磁場付近で、アブリコソフ格子状態からいったん巨大渦糸状態へ遷移し再び格子状態に復帰していることを反映したものと考えられる。これは、電磁場の3次元性を考慮したシミュレーション結果とも一致する。そこで、この磁場の値を固定して探針を移動し、波動関数振幅の動径分布を測定したところ、中央で小さく、ディスク周辺部で振幅が大きくなる巨大渦糸に特有な空間分布をしていることが明らかとなった。

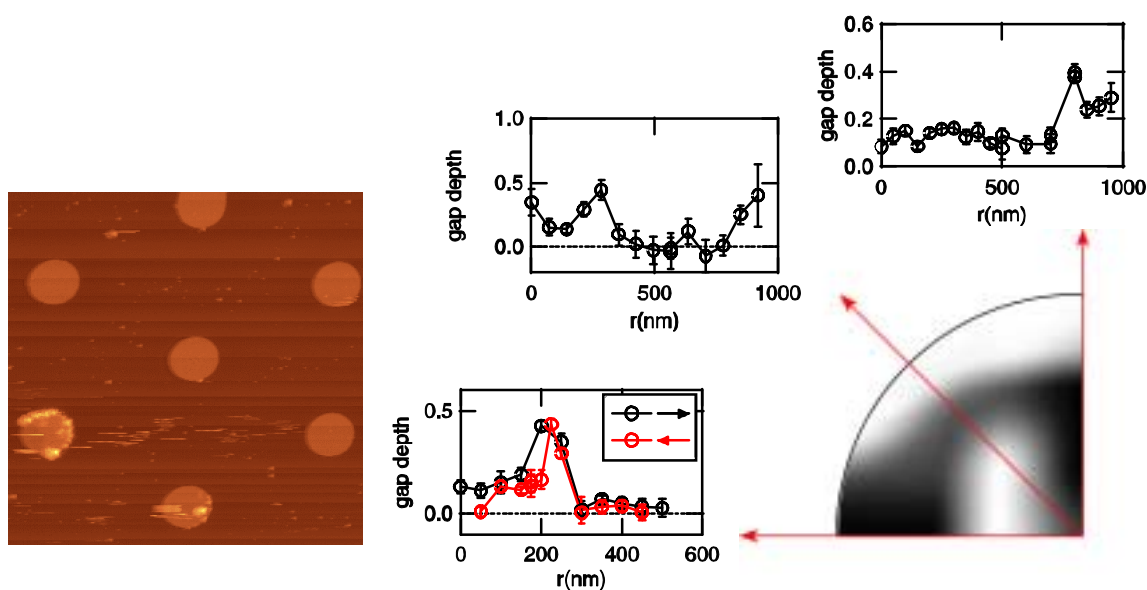


図 5-4 : (左図) 微小超伝導体 (In) ディスクのSEM像。(右図) 低温SSTMによる超伝導ギャップの局所測定をマッピングしたもの。

微小超伝導体の少数磁束多体系の研究としては、2次元電子系をプローブとして用いたオランダのグループの他、ベルギーやフランスのグループでも同じ問題意識で異なる方法の実験を行っている。理論的にはイギリスのグループが進んでいる。

## B. チェッカーボード磁場中の超伝導ネットワーク

2次元正方格子の超伝導ネットワークに微小磁性体を付加した系を作成し、ネットワークに空間交番磁場(チェッカーボード磁場)をかけた場合の超伝導転移の様子を調べた。電子線描画とイオンビームスパッターにより、Nbの2次元正方格子ネットワーク(単位胞  $0.5 \times 0.5 \mu\text{m}^2$ )の1つ置きのボンド上に強磁性体Dyの島を配した系を作製した。NbとDyの間にGeのスペーサー層を介しているため強磁性による超伝導対破壊効果はなく、強磁性体の役割は空間変調磁場を発生するのみである。この系のリトル・パークス(Little Parks)振動が一樣磁場およびチェッカーボード磁場の関数として変化する様子を観測した(図 5-5)。これに対応するモデルのホフスタッター・バタフライ・ダイアグラムを計算した結果(図 5-6)と比較することにより、チェッカーボード磁場が単位胞あたり  $1/4$  磁束量子の時に一樣磁場に対するリトルパークス振動の周期が半分になること、 $1/2$  磁束量子の時に一樣磁場ゼロと  $1/2$  磁束量子の状態が入れ替わること、などを見出した。

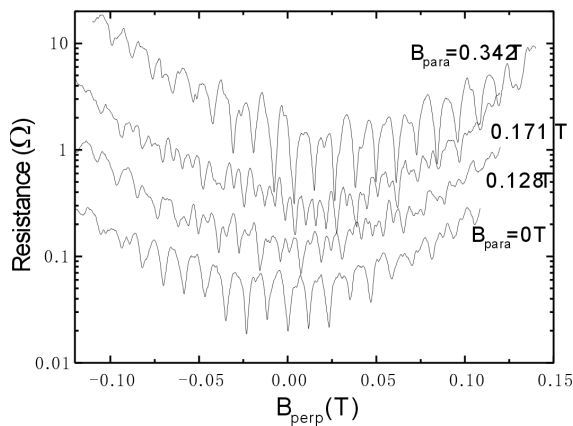


図 5-5: 2次元正方格子超伝導ネットワークに一樣磁場とチェッカーボード磁場を印加した場合のリトル・パークス振動

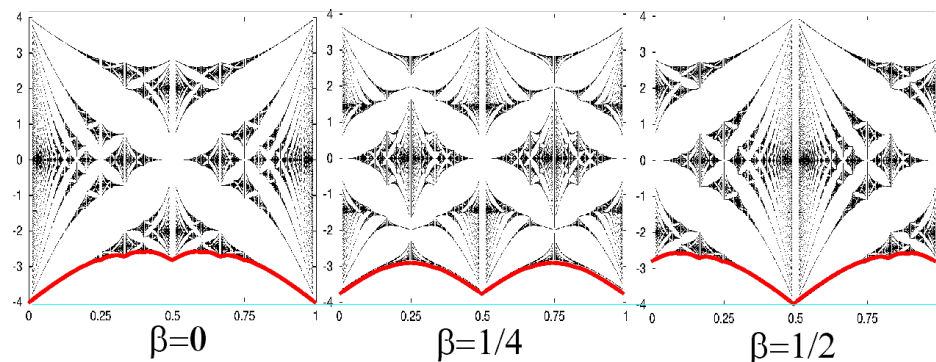


図 5-6: 2次元正方格子に一樣磁場とチェッカーボード磁場を印加した場合のホフスタッター・バタフライ・ダイアグラム。赤色の曲線はスペクトルエッジで、これが図 5.5 に示された超伝導相境界に対応する。

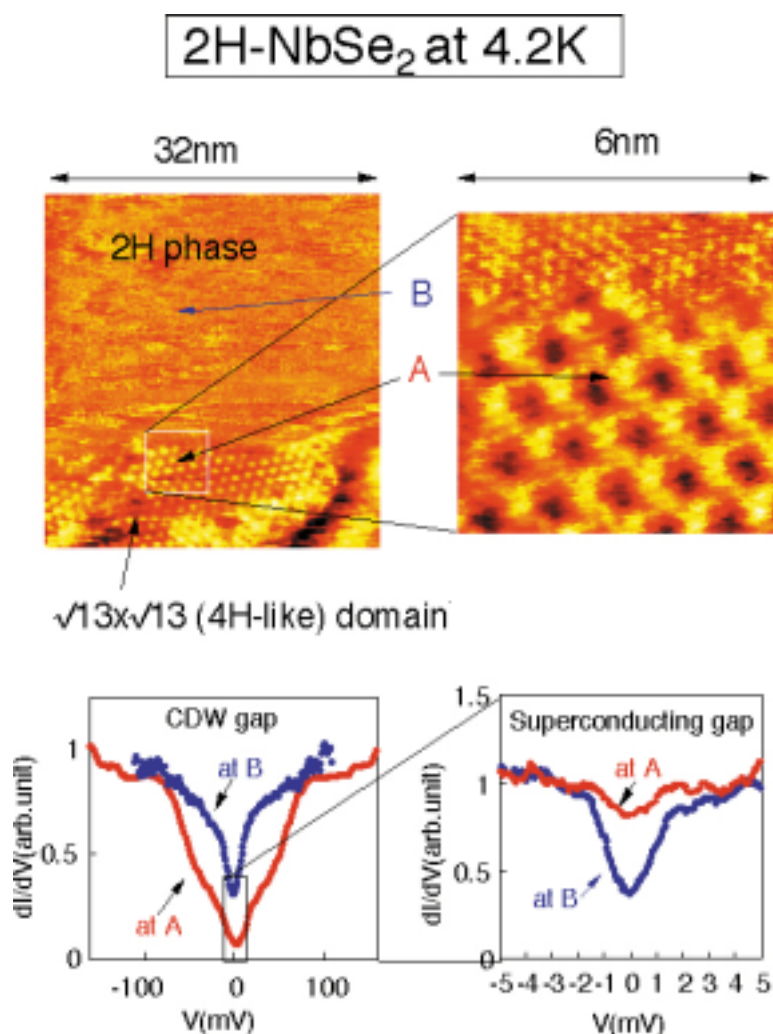
超伝導ネットワークやジョセフソン接合アレイの相転移については、グルノーブル(仏)、ハーバード(米)、ミネソタ大(米)、NECプリンストン研(米)、デルフト工科大(オランダ)など多くのグループによる研究が既に発表されているが、空間変調磁場下での超伝導ネッ

トワークを扱った例はいままでになく、本研究独自のものである。超伝導ネットワークはフラストレーション・パラメーターの値によって様々なユニヴァーサリティ・クラスの相転移を示すことが理論的に予想されており、一部は実験的にも確かめられている。チェッカーボード磁場がかかったネットワークの転移の本質を明らかにするために電流電圧特性の測定を進めることが必要である。

### C. 超伝導体表面上のナノ磁性体による局所超伝導破壊効果

磁性不純物による超伝導破壊は30年以上前から研究され、これまでの理論研究の中には、不純物のまわりの局所的な破壊の空間依存性について議論したものもあった。しかし実験的研究は、走査トンネル顕微鏡の出現を待ってようやく最近実現できるようになってきたばかりである。

本研究では層状超伝導体である $\text{NbSe}_2$ を選び、超高真空極低温STM/STSによる局所スペクトロスコピーを行った。 $\text{NbSe}_2$ はポリタイプによって、電荷密度波相と超伝導相の様子が異なる。このことは図5-5のデータに示されている。



このようにSTM/STSによる超伝導スペクトロスコピーに好適な系である $\text{NbSe}_2$ 表面を用いて、そこにFe微粒子を付着させた系で超伝導対破壊効果を調べた。 $\text{NbSe}_2$ 清浄表面を真空中の劈開により作製し、その上に室温超高真空中で微量のFeを蒸着した。これによって表面上に形成されたFe微粒子のSTM像が図5-8である。作製された試料はそのまま超高真空中で走査トンネル顕微鏡本体に装着して、4.2 Kで測定を行った。

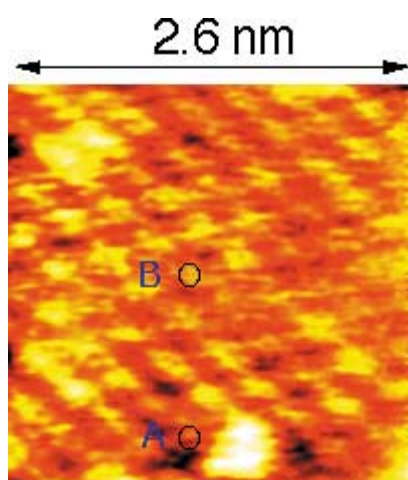


図5-8: Feを蒸着した $\text{NbSe}_2$ 表面のSTM像点Aの右側に見える白い塊がFe微粒子である。

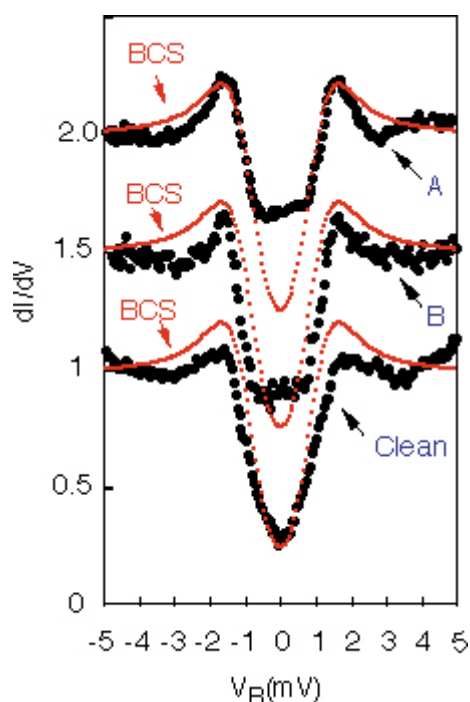


図5-9: 図5-8の点AおよびBにおけるトンネルスペクトル。

図5-9に示したように、Fe微粒子の近傍でのSTS測定では、超伝導準粒子状態密度がフェルミ・エネルギー付近で有限の値となった。Fe微粒子からの距離が遠くなるにしたがって、ギャップ中の状態密度は小さくなり、本来の超伝導ギャップのスペクトルへと回復する。これは、Fe微粒子の近傍に準粒子束縛状態ができたものと解釈できる。さらに、Fe微粒子が大きく密度も高い場合には、トンネル分光の結果はBCS理論から大きくはずれ、局所的なFe微粒子の配置に大きく依存する結果が得られている。

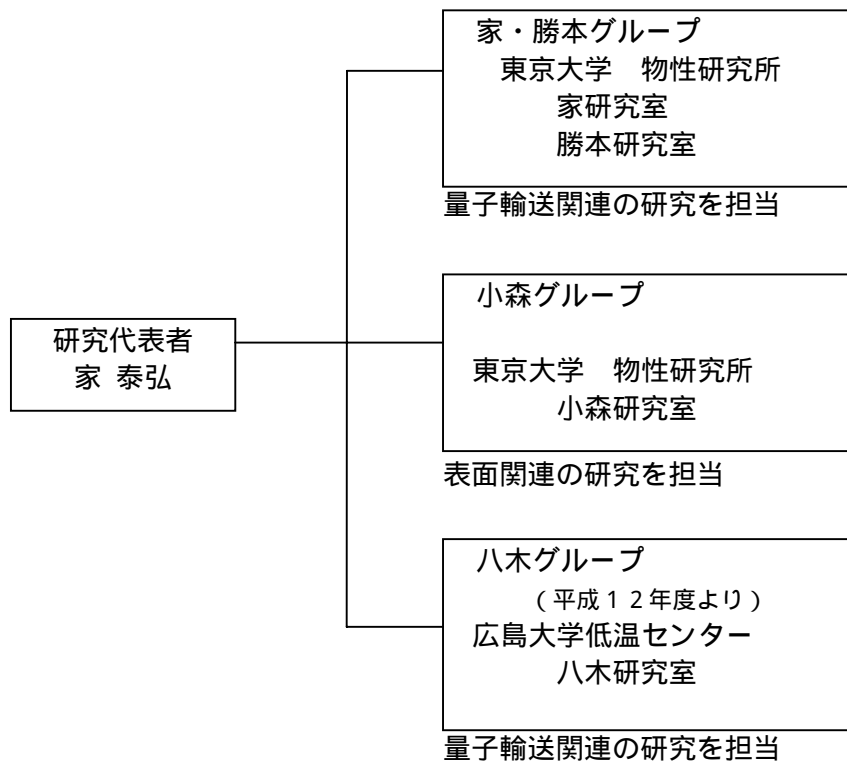
磁性原子あるいはクラスターによる超伝導対破壊効果の空間分解観察については、米国IBMの研究グループが先進的な実験を行っている。その他には類似の研究はない。本研究は、IBMグループが扱っている系よりも多くの原子が集まった微粒子を用いている点と層状超伝導体を用いている点が特徴である。IBMのグループは原子レベルの分解能をもつ高性能低温STM装置を用いた実験と詳しい解析を行って

る．このような研究をさらに進めるためには，より高い分解能をもって低温で動作するSTMの開発が必要である．磁性体超薄膜に誘起された超伝導については国内外で研究があるが，STMを用いた研究は他にはない．磁性体の影響で超伝導転移温度が低下しているので，この場合にも定量的な研究にはさらに低温での測定が必要である．この分野は基礎的な実験研究が始まったばかりであるが，今後の研究によりナノメートル領域での超伝導空間依存性が明らかとなれば，それを用いたデバイス等の応用へと発展する可能性がある．



#### 4. 研究実施体制

##### (1)体制



## (2)メンバー表

## 家・勝本グループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
家 泰弘	東京大学物性研究所	教授	総括,半導体2次元系の研究	平成8年12月～ 平成13年11月
勝本 信吾	東京大学物性研究所	助教授	量子輸送現象および希薄磁性半導体の研究	平成8年12月～ 平成13年11月
遠藤 彰	東京大学物性研究所	助手	半導体試料作製・低温量子輸送実験	平成8年12月～ 平成13年11月
平澤 正勝	東京大学物性研究所	助手	光学測定	平成8年12月～ 平成13年11月
小林 研介	東京大学物性研究所	助手	半導体試料作製・低温量子輸送実験	平成8年12月～ 平成13年11月
村山 千寿子	東京大学物性研究所	教務職員	低温輸送現象	平成10年4月～ 平成13年11月
福島 昭子	東京大学物性研究所	技官	電気化学的手法による微小磁性系の作成	平成8年12月～ 平成10年3月
橋本 義昭	東京大学物性研究所	技官	希薄磁性半導体の作製および測定	平成8年12月～ 平成13年11月
Zalalutudinov, Maxim	派遣先	CREST 研究員	低温STM分光	平成9年4月～ 平成11年11月
八木 隆多	派遣先	CREST 研究員	磁性細線における量子輸送現象	平成11年6月～ 平成12年5月
大岩 顕	東京大学物性研究所	大学院生	希薄磁性半導体の低温物性	平成8年12月～ 平成11年3月
加藤真由美	東京大学物性研究所	大学院生	変調下半導体2次元系の輸送現象	平成8年12月～ 平成12年3月
安藤 正人	東京大学物性研究所	大学院生	ランダム磁場中の2次元電子系	平成8年12月～ 平成13年3月
川村 稔	東京大学物性研究所	大学院生	多層量子ホール系における垂直伝導	平成8年12月～ 平成13年3月

佐藤 秀樹	東京大学物性研究所	大学院生	SETトランジスタを用いた微小超伝導体の研究	平成8年12月～平成13年3月
折戸 朗子	東京大学物性研究所	大学院生	磁性金属/超伝導体多層膜の研究	平成9年4月～平成11年3月
藤木 貴子	東京大学物性研究所	大学院生	微小ジョセフソン接合の研究	平成9年4月～平成11年3月
林 岳	東京大学物性研究所	大学院生	希薄磁性半導体における金属非金属転移	平成9年4月～平成13年11月
坂入 誠	東京大学物性研究所	大学院生	ポテンシャル変調下の2次元電子系	平成9年4月～平成12年3月
伊藤 優	東京大学物性研究所	大学院生	磁場変調下の超伝導ネットワーク	平成10年4月～平成12年3月
北地 三浩	東京大学物性研究所	大学院生	量子ドット系におけるコヒーレンス	平成10年4月～平成12年3月
藤岡 博幸	東京大学物性研究所	大学院生	単電子素子を用いた量子ホール系の研究	平成10年4月～平成13年11月
原 正大	東京大学物性研究所	大学院生	磁場変調下の2次元電子系	平成11年4月～平成13年11月
山崎 順稔	東京大学物性研究所	大学院生	磁場変調下の超伝導ネットワーク	平成11年4月～平成13年11月
吉田 智	東京大学物性研究所	大学院生	希薄磁性半導体における金属非金属転移	平成11年4月～平成13年11月
相川 恒	東京大学物性研究所	大学院生	量子ドットを埋め込んだA Bリング	平成12年4月～平成13年11月
寺田 達夫	東京大学物性研究所	大学院生	アンチドット格子における輸送現象	平成12年4月～平成13年11月
植木 雅明	東京大学物性研究所	大学院生	量子ポイントコンタクトの輸送現象	平成13年4月～平成13年11月
小寺 克昌	東京大学物性研究所	大学院生	2層量子ホール系における輸送現象	平成13年4月～平成13年11月
後藤 信陽	東京大学物性研究所	大学院生	半導体量子ドットの研究	平成13年4月～平成13年11月

窪田 和子	東京大学物性研究所	事務補助員	事務処理	平成8年12月～平成13年11月
川村 順子	東京大学物性研究所	事務補助員	事務処理	平成13年8月～平成13年11月

小森グループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
小森 文夫	東京大学物性研究所	助教授	表面関連研究の総括	平成8年12月～平成13年11月
服部 賢	東京大学物性研究所	助手	低温STM等，表面評価装置の開発	平成8年12月～平成10年3月
中辻 寛	派遣先	CREST 研究員	表面磁性研究	平成10年4月～平成10年9月
中辻 寛	東京大学物性研究所	助手	磁性体ナノワイヤーの伝導	平成10年9月～平成13年11月
飯盛 拓嗣	東京大学物性研究所	技官	表面評価手法の開発	平成8年12月～平成13年11月
山田 正理	派遣先	CREST 研究員	表面評価手法の開発	平成9年4月～平成10年3月
山田 正理	東京大学物性研究所	研究員	表面評価手法の開発	平成10年4月～平成13年11月
蔡 永強 (Cai, Yong Qiang)	派遣先	CREST 研究員	光電子分光による磁性体表面の研究	平成10年11月～平成12年1月
李 起東 (Lee, Ki-Dong)	派遣先	CREST 研究員	表面自己形成磁性体ドットアレイの磁気光学測定	平成10年4月～平成13年11月
内藤 賀公	派遣先	CREST 研究員	表面自己形成磁性体ドットアレイの低温STM測定	平成12年4月～平成13年3月
徐 明春 (Xu, Ming-Chun)	派遣先	CREST 研究員	光電子分光による磁性体表面の研究	平成12年9月～平成13年9月
植田 正輝	東京大学物性研究所	大学院生	STMによる光磁気効果の測定	平成8年12月～平成10年3月
櫛田 桂一	東京大学物性研究所	大学院生	表面磁性	平成9年4月～平成11年3月
新井 紳太郎	東京大学物性研究所	大学院生	極低温STMによる磁性ドットの超伝導破壊効果測定	平成9年4月～平成11年3月

大野 真也	東京大学物性研究所	大学院生	S T Mによるドットアレイ形成測定	平成10年4月～平成13年11月
河村 紀一	NHK技研	研究員	自己形成磁性ドットアレイの応用	平成13年4月～平成13年11月
高橋 利栄	東京大学物性研究所	事務補助員	経理事務など	平成8年12月～平成13年11月

#### 八木グループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
八木 隆多	広島大学低温センター	助教授	磁性金属微細系の量子輸送	平成12年6月～平成13年11月
先田 成伸	広島大学低温センター	助手	磁性金属微細系の量子輸送	平成13年4月～平成13年11月

### 5. 研究期間中の主な活動

#### (1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成11年11月12日	JST/CREST 家研究チーム研究会	東京大学物性研究所 (六本木)	54名	微細構造や表面におけるスピン自由度ないしは磁性に関連した量子現象に関して、(1) 空間変化磁場中の2次元電子系 (2) 金属ナノワイヤーにおけるコンダクタンス量子化、(3) 希薄磁性半導体、の3テーマを選び、当グループの研究現況の報告とともに、密接に関連する研究を行っている研究者のご講演をいただき、討論を行った。
平成12年10月23日～26日	The 8th NEC International Symposium on the Spin-Related Quantum Transport in Mesoscopic Systems	りんどう湖国際ホテル (那須)	40名	当事業主催ではないが、本研究に密接に関連したテーマである「スピン関連伝導現象」に関する下記の国際シンポジウムを本研究代表者である家が組織委員長を務めて開催した。
平成13年11月14日～16日	Yamada Conference LVII on Atomic-scale surface designing for functional low-dimensional materials	産業総合研究所講堂 (つくば)	150名	当事業主催ではないが、本研究および本領域に密接に関連したテーマである「表面低次元機能物質の創製と物性」に関する国際会議を小森が事務局長を務めて開催した。

(2) 招聘した研究者等

該当なし

6 . 主な研究成果

(1) 論文発表 : 原著論文 73 篇 (うち 10 篇は印刷中) (投稿中が 3 篇)  
解説記事 11 篇

【原著論文】

- [1] A.Oiwa, S.Katsumoto, A.Endo, M.Hirasawa, Y.Iye, H.Ohno, F.Matsukura, A.Shen, and Y.Sugawara  
Nonmetal-Metal-Nonmetal Transition and Large Negative Magnetoresistance in (Ga,Mn)As/GaAs  
Solid State Commun., 103 (1997) 209-213.
- [2] S.Koshihara, A.Oiwa, M.Hirasawa, S.Katsumoto, Y.Iye, C.Urano, H.Takagi, and H.Munekata  
Fermagnetic Order Induced by Photogenerated Carriers in Magnetic III-V Semiconductor Heterostructures of (In,Mn)As/GaSb  
Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 4617-4620.
- [3] M.Kato, A.Endo and Y.Iye  
Profile of Periodic Potential Modulation Probed by Magnetoresistance Oscillation of a Two-Dimensional Electron Gas  
J. Phys. Soc. Jpn., 66 (1997) 3178-3182
- [4] F.Komori, T.Iwaki, K.Hattori, O.Shiino and T.Hasegawa  
New Superstructure on the Surface of 2H-NbSe<sub>2</sub> and Tunneling Spectra at 4.2 K,  
J. Phys. Soc. Jpn. 66 (1997) 298.
- [5] M.Kato, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye  
Control of Magnetic Field Modulation on Two-Dimensional Electron Gas at the GaAs/AlGaAs Heterointerface by Parallel Magnetic Field  
Solid State Electronics, 42 (1998) 1121-1124.
- [6] M.Ando, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye  
Detection of Fractional Edge Channel by Quantum Point Contacts  
Solid State Electronics, 42 (1998) 1179-1182.
- [7] F.Komori, T.Iwaki, K.Hattori, O.Shiino and T.Hasegawa  
Tunneling Spectroscopy around the Boundary of a Small Impurity Phase on the Surface of 2H-NbSe<sub>2</sub>  
Appl. Phys. A66 (1998) S135
- [8] M.Kato, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye  
Two-Dimensional Electron Gas under Spatially Modulated Magnetic Field --- a Test Ground for Electron-Electron Scattering in Controlled Environment  
Phys. Rev. B58 (1998) 4876-4881.
- [9] F. Komori, K. Hattori, T. Iwaki,  
Spatial Change of Tunneling Spectra around Small Iron Islands on Surfaces of Superconducting 2H-NbSe<sub>2</sub>,  
J. Phys.Soc. Jpn. 67 (1998) 2614-2617.
- [10] A.Oiwa, S.Katsumoto, A.Endo, M.Hirasawa, Y.Iye, H.Ohno, F.Matsukura, A.Shen,



- and Y.Sugawara,  
Giant Negative Magnetoresistance of (Ga,Mn)As/GaAs in the Vicinity of a  
Metal-Insulator Transition,  
Phys. Stat. Sol. (b) 205 (1998) 167-171.
- [11] S.Katsumoto, A.Oiwa, Y.Iye, H.Ohno, F.Matsukura, A.Shen, and Y.Sugawara,  
Strongly Anisotropic Hopping Conduction in (Ga,Mn)As/GaAs,  
Phys. Stat. Sol. (b) 205 (1998) 115-118.
- [12] M. Hirasawa, S. Katsumoto and Y. Iye,  
Coulomb Blockade in Arrays of Quantum Dots,  
Physica B249-251 (1998) 252-256.
- [13] M.Ando, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye,  
Conduction Through Point Contact in Fractional Quantum Hall Liquid,  
Physica B249-251 (1998) 426-429.
- [14] T. Takamasu, G. Kido, M. Ohno, N. Miura, A. Endo, M. Kato, S. Katsumoto and Y. Iye,  
Possible Explanation of the High Temperature Extrapolated Value of Diagonal  
Resistivity at  $\nu = 1$  in terms of Skyrmion,  
Physica B249-251 (1998) 391-394.
- [15] M.Kawamura, A.Endo, M.Hirasawa, S.Katsumoto and Y.Iye,  
Angular Dependent Magnetoresistance Oscillation in GaAs/AlGaAs Superlattice,  
Physica B249-251 (1998) 882-886.
- [16] M.Kato, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye  
Strain-Induced Potential Modulation versus Magnetic Field Modulation on  
Two-Dimensional Electron Gas at the GaAs/AlGaAs Heterointerface,  
Physica B249-251 (1998) 753-757.
- [17] H.Sato, S.Katsumoto and Y.Iye,  
Fluxoid States in Mesoscopic Superconductors,  
Physica B249-251 (1998) 453-457.
- [18] A.Oiwa, S.Katsumoto, A.Endo, M.Hirasawa, Y.Iye, F.Matsukura, A.Shen,  
Y.Sugawara and H.Ohno,  
Low Temperature Conduction and Giant Negative Magnetoresistance in III-V Based  
Diluted Magnetic Semiconductor: (Ga,Mn)As/GaAs,  
Physica B249-251 (1998) 775-779.
- [19] A.Orito, A.Fukushima, S.Katsumoto and Y.Iye,  
Microstructured Thin Films and Multilayers of Superconductor and Ferromagnetic  
Metal,  
Solid State Electronics, 42 (1998) 1481-1488.
- [20] H.Sato, S.Katsumoto, and Y.Iye,  
Non-Invasive Measurements of Mesoscopic Superconductors by Superconducting Single  
Electron Transistors,  
Solid State Electronics, 42 (1998) 1463-1466.
- [21] M.Kato, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye,  
Control of Magnetic Field Modulation on Two-Dimensional Electron Gas at the  
GaAs/AlGaAs Heterointerface by Parallel Magnetic Field,  
Solid State Electronics, 42 (1998) 1121-1124.
- [22] M.Ando, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye,  
Detection of Fractional Edge Channel by Quantum Point Contacts,  
Solid State Electronics, 42 (1998) 1179-1182.

- [23] S.Koshihara, H.Munekata, A.Oiwa, M.Hirasawa, S.Katsumoto, Y.Iye, C.Urano and H.Takagi,  
Photocarrier Induced by Ferromagnetic Order in III-V-Based Magnetic Semiconductor Heterostructures of (In,Mn)As/GaSb,  
Physica E2 (1988) 417-420
- [24] A. Oiwa, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Iye, H. Munekata and H. Ohno,  
Magnetic and Transport Properties of Ferromagnetic Semiconductor Heterostructures (In,Mn)As/(Ga,Al)Sb,  
Phys. Rev. B59 (1999) 5826-5831
- [25] N.Akiba, F.Matsukura, N.A.Shen, Y.Ohno, H.Ohno, A.Oiwa, S.Katsumoto, and Y.Iye,  
Interlayer Exchange in (Ga,Mn)As/(Al,Mn)As/(Ga,Mn)As Semiconducting Ferromagnet/Nonmagnet/Ferromagnet Structures,  
Appl. Phys. Lett. 73 (1998) 2122-2124.
- [26] M. Kato, A. Endo, M. Sakairi, S. Katsumoto and Y. Iye,  
Electron-Electron Umklapp Process in Two-Dimensional Electron Gas under a Spatially Alternating Magnetic Field,  
J. Phys. Soc. Jpn. 68 (1999) 1492-1495.
- [27] F.Matsukura, N.Akiba, A.Shen, Y.Ohno, A.Oiwa, S.Katsumoto, Y.Iye and H.Ohno,  
Magnetotransport Properties of (Ga,Mn)As/GaAs/(Ga,Mn)As Trilayer Structures,  
J. Mag. Soc. Jpn., 23 (1999) 99-101.
- [28] S.Katsumoto, M.Kato, A.Endo and Y.Iye,  
Electronic Transport under Spatially Modulated Magnetic Field,  
Proc. 4th Int. Symp. On Advanced Physical Fields, ed. G.Kido (Tsukuba, Feb, 1999) p.65-68.
- [29] Y.Oikawa, T.Takamasu, G.Kido, A.Endo, M.Kato, S.Katsumoto and Y.Iye  
Effect of the Inner Current Contact in Quantum Hall Regime  
Proc. 4th Int. Symp. On Advanced Physical Fields, ed. G.Kido (Tsukuba, Feb, 1999) p.333-336
- [30] M.Zalalutdinov, H.Fujioka, Y.Hashimoto, S.Katsumoto and Y.Iye:  
Magnetic Flux Configuration in Mesoscopic Superconductor Probed by Scanning Tunneling Spectroscopy  
J. Phys. Soc. Jpn., 68 (1999) 2872-2873
- [31] S.Ito, M.Ando, S.Katsumoto and Y.Iye:  
Superconducting Network in Spatially Modulated Magnetic Field --- Hofstadter-Type Problem in Checkerboard Field  
J. Phys. Soc. Jpn., 68 (1999) 3158-3161.
- [32] M.Ando, S.Ito, S.Katsumoto and Y.Iye:  
Hofstadter Butterfly in Checkerboard Field  
J. Phys. Soc. Jpn., 68 (1999) 3462-3463
- [33] S.Katsumoto, H.Sato and Y.Iye:  
Duality between Single-Electron Phenomena and Flux Quantization in Mesoscopic Superconductors  
Jpn. J. Appl. Phys. 38 (1999) 350-353.
- [34] F. Komori, K. Kushida, K.Hattori, S. Arai and T. Iimori:  
Growth of Ag Island on Ge(001)-2x1 Surfaces below Room Temperature  
Surf. Sci. 438 (1999) 123.
- [35] F.Komori and K.Nakatsuji  
Quantized Conductance through Atomic-Sized Iron Contacts at 4.2 K

- J. Phys. Soc. Jpn. 68 (1999) 3786.
- [36] M.Kawamura, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye  
Non-Ohmic Vertical Transport in Multilayered Quantum Hall Systems  
Physica E6 (2000) 698-701.
- [37] M.Kato, M.Sakairi, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye  
Electron-Electron Scattering in Two-Dimensional Electron Gas under a Controllable Spatially Modulated Magnetic Field  
Physica E6 (2000) 735-737.
- [38] Minoru Kawamura, Akira Endo, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye  
Non-Ohmic Out-of-Plane Conductance in a Multilayered Quantum Hall System  
Physica B280 (2000) 380-381.
- [39] Mayumi Kato, Makoto Sakairi, Akira Endo, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye  
Electron-Electron Umklapp Scattering in Two-Dimensional Electron Gas under Lateral Magnetic Periodicity  
Physica B284-288 (2000) 1902-1903.
- [40] Masato Ando, Akira Endo, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye  
Transport in Two-Dimensional Electron Gas in Inhomogeneous Magnetic Field  
Physica B284-288 (2000) 1900-1901.
- [41] Maxim Zalalutdinov, Hiroyuki Fujioka, Yoshiaki Hashimoto, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye  
Vortex States in Microfabricated Superconducting Disk Probed by Tunneling Spectroscopy  
Physica B284-288 (2000) 817-818.
- [42] Yoshiaki Hashimoto, Shingo Katsumoto, Chizuko Murayama, Yasuhiro Iye  
Spin Diffusion Length and Giant Magnetoresistance in Spin-Valve Tri-layers  
Physica B284-288 (2000) 1247-1248.
- [43] Takashi Hayashi, Shingo Katsumoto, Yoshiaki Hashimoto, Akira Endo, Minoru Kawamura, Maxim Zalalutdinov and Yasuhiro Iye  
Anisotropy and Barkhausen Jumps in Diluted Magnetic Semiconductor (Ga,Mn)As  
Physica B284-288 (2000) 1175-1176.
- [44] A.Oiwa, A.Endo , S.Katsumoto, Y.Iye and H.Munekata  
Staircase-like Hysteresis Loop in III-V Compound Diluted Magnetic Semiconductor (In,Mn)As at Low Temperatures  
Physica B284-288 (2000) 1173-1174.
- [45] T.Hayashi, Y.Hashimoto, S.Katsumoto and Y.Iye  
Effect of Low Temperature Annealing on the Transport and Magnetism of Diluted Magnetic Semiconductor (Ga,Mn)As  
Appl. Phys. Lett., 78 (2001) 1691-1693.
- [46] A.Endo and Y.Iye  
Magnetoresistance of Lateral Hyperlattice: Independent Control of Spacing and Phase of Commensurability Oscillation  
J. Phys. Soc. Jpn. 69 (2000) 3656-3659
- [47] A.Endo and Y.Iye  
Novel Structures near  $\nu=9/2$  in Short Period Lateral Superlattices  
Solid State Commun.117 (2001) 249-254.
- [48] A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye  
Envelope of Commensurability Magnetoresistance Oscillation in Unidirectional Lateral Superlattices

- Phys. Rev. B62 (2000) 16761-16767.
- [49] A.Endo, M.Kawamura, S.Katsumoto and Y.Iye  
Magnetotransport of  $\nu=3/2$  Composite Fermions under Periodic Effective  
Magnetic-Field Modulation  
Phys. Rev. B63 (2001) 113310-1-4.
- [50] H.Fujioka, S.Katsumoto and Y.Iye  
Detection of Edge-Conducting Channels in Quantum Hall Systems Using a Single  
Electron Transistor  
Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2001) 2073-2076.
- [51] Ki-Dong Lee, Takushi Iimori and Fumio Komori  
Magnetic Properties of Co Dot Arrays Grown on the N-Modified Cu(001) c(2x2) Surface  
Surf. Sci., 454-456 (2000) 860-864.
- [52] K.Mukai, Y.Matsumoto, K.Tanaka and F.Komori  
Self-Organized Structure in Co Thin Film Grown on c(2x2)-N-Cu(100) Surfaces  
Surf. Sci., 450 (2000) 44-50.
- [53] T.Hayashi, Y.Hashimoto, S.Yoshida, S.Katsumoto and Y.Iye  
Control of material parameters and metal-insulator transition in (Ga,Mn)As  
Physica E10 (2001) 130-134.
- [54] S. Katsumoto, T. Hayashi, Y. Hashimoto, Y. Iye, Y. Ishiwata, M. Watanabe, R.Eguchi,  
T. Takeuchi, Y. Harada, S. Shin and K. Hirakawa  
Magnetism and Metal-Insulator Transition in III-V Based Diluted Magnetic  
Semiconductors  
Mat. Sci. and Eng., 84 (2001) 88-95.
- [55] A.Endo, M.Kato, M.Kawamura, M.Ando, S.Katsumoto and Y.Iye  
Two-Dimensional Electrons in Spatially Inhomogeneous Magnetic Field  
Mat. Sci. and Eng., 84 (2001) 37-43.
- [56] F.Komori and K.Nakatsuji  
Quantized Conductance through Ion Point Contacts  
Mat. Sci. and Eng., 84 (2001) 102-106.
- [57] F. Komori, K.D. Lee, K. Nakatsuji, T. Iimori, and Y.Q. Cai: Growth and  
magnetism of Co nanometer-scale dots squarely arranged on a Cu(001)-c(2x2)N surface,  
Phys. Rev. B63 (2001) 214420(8).
- [59] S. Ohno, K. Nakatsuji and F. Komori:  
Growth of ferromagnetic dot arrays on Cu(001) c(2x2) N surfaces,  
Surf. Sci. 493 (2001) 539-546.
- [60] S.Katsumoto, T.Hayashi, Y.Hashimoto, Y.Iye, Y.Ishiwata, M.Watanabe, R.Eguchi,  
T.Takeuchi, Y.Harada, S.Shin, and K.Hirakawa  
Nature of MAGnetism in III-V based Diluted Magnetic Semiconductors  
Proc. 10th Int. Conf. on Narrow Gap Semiconductors and Related Small Energy  
Phenomena, Physics and Applications, IPAP Conference Series 2, (2001) 261-264.
- [61] Y.Iye, A.Endo, S. Katsumoto, Y. Ohno, S. Shimomura and S. Hiyamizu  
Magnetotransport in Short Period Lateral Superlattices  
Proc. 10th Int. Conf. on Narrow Gap Semiconductors and Related Small Energy  
Phenomena, Physics and Applications, IPAP Conference Series 2, (2001) 25-28.
- [62] M.Hara, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye  
Transport in Semiconductor/Ferromagnet Hybrid Systems  
Proc. 10th Int. Conf. on Narrow Gap Semiconductors and Related Small Energy  
Phenomena, Physics and Applications, IPAP Conference Series 2, (2001) 96-98.

- [63] Y.H.Matsuda, T.Ikaida, N.Miura, Y.Hashimoto, S.Katsumoto, J.Kono, M.A.Zudov and H.Munekata  
Hole Cyclotron Resonance in  $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$   
Proc. 10th Int. Conf. on Narrow Gap Semiconductors and Related Small Energy Phenomena, Physics and Applications, IPAP Conference Series 2, (2001) 93-95.
- [64] Y.Iye, A.Endo, S. Katsumoto, Y. Ohno, S. Shimomura and S. Hiyamizu  
Suppression of Exchange Enhancement of Spin Gap in Quantum Hall Systems by Ultra-Short Period Lateral Superlattice  
J. Phys. Chem. Solids, (2002), in print.
- [65] T.Hayashi, Y.Hashimoto, S.Katsumoto and Y.Iye  
Metal-Insulator Transition in  $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$   
J. Phys. Chem. Solids, (2002), in print.
- [66] H.Fujioka, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye  
Observation of Edge States in Fractional Quantum Hall Effect  
J. Phys. Chem. Solids, (2002), in print.
- [67] K.Kobayashi, H.Aikawa, S.Katsumoto and Y.Iye  
Observation of an Enhanced Aharonov-Bohm Effect  
J. Phys. Chem. Solids, (2002), in print.
- [68] M.Hara, A.Endo, S.Katsumoto, and Y.Iye  
Magnetotransport in 2DEG with Magnetic Barriers  
Physica E, (2002), in print.
- [69] Y.Iye, A.Endo, S.Katsumoto, Y.Ohno, S.Shimomura and S.Hiyamizu  
Magnetotransport in Ultrashort Period Unidirectional Lateral Superlattices  
Physica E, (2002), in print.
- [70] Y.Iye, A.Endo, S. Katsumoto, Y. Ohno, S. Shimomura and S. Hiyamizu  
Quantum Transport in Two-Dimensional Electron Gas in Ultra-Short Period Lateral Superlattices  
Proc. 7th Int. Symp.on the Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (World Scientific), in print.
- [71] K.Kobayashi, H.Aikawa, S.Katsumoto and Y.Iye  
Observation-Dependent Decoherence in an Aharonov-Bohm Effect  
Proc. 7th Int. Symp.on the Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (World Scientific), in print.
- [72] Y. Q. Cai, K. Nakatsuji, S. Ohno, T. Iimori, M. Yamada and F. Komori  
Direct Evidence for Itinerant Magnetite above and below the Verwey Transition Temperature,  
J. Elect. Spec. (2002), in print.
- [73] M.C. Xu, T. Iimori, K.D. Lee and F. Komori  
Magnetic Anisotropy of Cs-Adsorbed fcc Thin Films on  $\text{Cu}(001)$  Surfaces,  
Surf. Sci. (2002), in print.
- [74] K.Kobayashi, H.Aikawa, S.Katsumoto and Y.Iye  
Tuning of the Fano Effect through a Quantum Dot in an Aharonov-Bohm Interferometer  
submitted to Phys. Rev. Lett.
- [75] K.Kobayashi, H.Aikawa, S.Katsumoto and Y.Iye  
Probe-Configuration-Dependent Decoherence in an Aharonov-Bohm Ring  
submitted to Phys. Rev. Lett.
- [76] F. Komori, S. Ohno and K. Nakatsuji:  
Arrays of Magnetic Nanodots on Nitrogen-Modified  $\text{Cu}(001)$  Surfaces,  
submitted to J. Phys. C (invited review paper)

【解説記事】

- [1] 腰原 伸也, 大岩 顕  
- 族希薄磁性半導体(In,Mn)Asの光キャリア誘起強磁性  
応用磁気学会誌 21 (1997) 1121-1125.
- [2] 勝本 信吾, 佐藤 秀樹  
ナノスケール超伝導と単電子素子  
固体物理 33 (1998) 585-595.
- [3] 小森文夫  
単結晶 NbSe<sub>2</sub> 表面の異常な低温STM像  
固体物理 33 (1998) 99-105.
- [4] 勝本 信吾, 大岩 顕  
- 族希薄磁性半導体の電気伝導  
日本物理学会誌 vol.53 (1998) 491-498.
- [5] 小森文夫  
STMでみた超伝導と電荷密度波との境界  
パリティ 13-07(1998) 39-42.
- [6] 家 泰弘, 加藤 真由美, 遠藤 彰,  
人工磁気周期構造と2次元電子系  
日本物理学会誌 vol.53 (1998) 750-757
- [7] 家 泰弘  
非一様磁場中での量子輸送  
固体物理 34 (1999) 359-366.
- [8] 家 泰弘  
洗濯板に乗せられた電子  
パリティ 15(2000) 28-33
- [9] 家 泰弘  
超伝導ネットワークの相転移  
パリティ 16 (2001) 21-26
- [10] 家 泰弘  
半導体のスピンはどこまで制御できるか?  
大学と科学「電気と磁気の新しい交わり」クバプロ (2001) 84-96
- [11] 小森文夫  
強磁性量子細線の異常なふるまい  
パリティ 15-12 (2000) 41-44.

(2) 口頭発表

国際会議発表 (口頭発表: 47件, ポスター発表: 35件: 計82件)

【口頭発表】(番号にアンダーラインを付したものは招待講演)

- [1] Y.Iye,  
Magnetic-Field-Induced Metal-Insulator Transition in Graphite and Diluted Magnetic Semiconductors  
Royal Society Discussion Meeting,  
London (UK), March 5-6, 1997.
- [2] F. Komori:  
Scanning tunneling spectroscopy of surface modified superconductors  
Japanese-German Symposium on dynamics and kinetics of surface process  
Berlin (Germany) June, 1997
- [3] F.Komori, T.Iwaki, K.Hattori, O.Shiino and T.Hasegawa:  
Tunneling Spectroscopy around the Boundary of a Small Impurity Phase on the Surface



- of 2H-NbSe<sub>2</sub>  
 The 9th international conference on scanning tunneling  
 microscopy/spectroscopy and related techniques  
 Hamburg (Germany), July, 1997.
- [4] A.Oiwa, S.Katsumoto, A.Endo, M.Hirasawa, Y.Iye, H.Ohno, F.Matsukura, A.Shen, and  
 Y.Sugawara,  
 Giant Negative Magnetoresistance of (Ga,Mn)As/GaAs in the Vicinity of a  
 Metal-Insulator Transition,  
 The 7th Int. Conf. on Hopping and Related Phenomena,  
 Budapest (Hungary), August, 1997
- [5] S.Katsumoto, A.Oiwa, Y.Iye, H.Ohno, F.Matsukura, A.Shen, and Y.Sugawara  
 Strongly Anisotropic Hopping Conduction in (Ga,Mn)As/GaAs,  
 The 7th Int. Conf. on Hopping and Related Phenomena,  
 Budapest (Hungary), August, 1997
- [6] H.Sato, S.Katsumoto and Y.Iye,  
 Fluxoid States in Mesoscopic Superconductors,  
 The 12th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-12)  
 Tokyo, September, 1997
- [7] A.Oiwa, S.Katsumoto, A.Endo, M.Hirasawa, Y.Iye, F.Matsukura, A.Shen,  
 Y.Sugawara and H.Ohno,  
 Low Temperature Conduction and Giant Negative Magnetoresistance in III-V Based  
 Diluted Magnetic Semiconductor: (Ga,Mn)As/GaAs,  
 The 12th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-12)  
 Tokyo, September, 1997
- [8] F.Komori and K.Hattori  
 STM Studies of Surface Modified Superconductors  
 Japan-Germany Seminar,  
 Nikko, September, 1997
- [9] A.Orito, A.Fukushima, S.Katsumoto and Y.Iye,  
 Microstructured Thin Films and Multilayers of Superconductor and Ferromagnetic  
 Metal,  
 Nanostructure Physics and Electronics (NPE'97)  
 Tokyo, September, 1997.
- [10] A.Endo, M.Kato, S.Katsumoto, and Y.Iye  
 Two-Dimensional Electrons in Spatially Alternating Magnetic Field --- A Test Ground  
 for Electron-Electron Scattering,  
 The American Physical Society, March Meeting,  
 Atlanta, (USA), March, 1998
- [11] Y.Iye  
 Composite Fermions and Bosons --- An Invitation to Electron Masquerade in Quantum  
 Hall,  
 The 1st Annual Symposium on Japanese-American Frontiers of Science  
 Irvine(USA), August, 1998.
- [12] S.Katsumoto, H.Sato and Y.Iye  
 Superconducting Order Parameters Detected by Single-Electron Transistors,  
 The 6th International Symposium on the Foundations of Quantum Mechanics in the  
 Light of New Technology (ISQM-Tokyo-98)  
 Hatoyama, August, 1998.
- [13] M.Kato, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye

- Electron-Electron Scattering in Two-Dimensional Electron Gas under Spatially Modulated Magnetic Field,  
The 6th International Symposium on the Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-Tokyo-98)  
Hatoyama, August 23-26, 1998.
- [14] Y.Iye, A.Oiwa, A.Endo, S.Katsumoto, F.Matsukura, A.Shen, H.Ohno and .Munekata  
Metal-Insulator Transition and Magnetotransport in III-V Compound Diluted Magnetic Semiconductors,  
The 7th NEC Symposium on Phase Control in Spin-Charge-Orbital Complex Systems (Nasu, Nov. 1998)
- [15] Y.Iye  
Transport in Semiconductor Heterostructure and Superconductor under Spatially Modulated Magnetic Field,  
Symposium on Exactly Aligned Magnetic field Effects in Low-Dimensional Superconductors (Kyoto, Nov. 1998)
- [16] Y.Iye, M.Kato, A.Endo, M.Kato, and S.Katsumoto  
Two-Dimensional Electrons in Spatially Alternating Magnetic Field --- A Test Ground for Electron-Electron Scattering,  
The 16th Quantum Interface Electronics Research Center Seminar (Sapporo, Feb. 1999)
- [17] S.Katsumoto, M.Kato, A.Endo and Y.Iye  
Electronic Transport under Spatially Modulated Magnetic Field,  
International Symposium on Advanced Physical Fields, (Tsukuba, Feb, 1999)
- [18] Minoru Kawamura, Akira Endo, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye  
Non-Ohmic Out-of-Plane Conductance in a Multilayered Quantum Hall System  
The 22th Int. Conf. on Low Temperature Physics, (LT22)  
Helsinki (Finland) August, 2000
- [19] Lee Ki-Dong, T.Iimori and F.Komori:  
Ferromagnetism of Square Arrays of Interconnected Tiny Co Dots on N-modified Cu(001) Surface  
The 18th European Surface Science Conference,  
Wien, (Austria), September, 1999
- [20] Lee Ki-Dong, T.Iimori and F.Komori:  
Magnetic Properties of a Square Array of Interconnected Co Nanodots  
The 1st Asian-Australian Conference on Vacuum and Surface Science,  
Chiba, September, 1999
- [21] Y.Iye  
Ferromagnet/Semiconductor and Ferromagnet/Superconductor Hybrid Structures: Electron Transport under Spatially Modulated Magnetic Fields  
The 228th W.E.Heraeus Seminar on Metal-Nonmetal Structures for Magnetoelectronics ,  
Bad Honnef (Germany), January, 2000
- [22] F.Komori:  
Magnetic Properties of 2D-Coupled Co Dots on N-Modified Cu(001) Surfaces  
The 65th Okazaki Conference,  
Okazaki, January, 2000
- [23] Y.Iye, M.Kato, M.Ando, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye  
Transport in Two-Dimensional Electron Gas under a Spatially Modulated Magnetic Field  
Int. Symp. on Nanoscale Magnetism and Transport (INMT-2000),  
Sendai, March, 2000

- [24] T.Hayashi, Y.Hashimoto, S.Yoshida, S.Katsumoto and Y.Iye  
Control of material parameters and metal-insulator transition in (Ga,Mn)As  
Int. Conf. on Phys. and Appl. Spin-Related Phenomena in Semicond (PASPS2000)  
Sendai, September, 2000
- [25] F.Komori  
Growth and Magnetism of Co Dot Arrays on Cu(001) c(2x2)-N Surfaces  
The 16th Int. Conf. on Magnetic Thin Film Surface  
Natal (Brazil), August, 2000
- [26] K.Nakatsuji  
Spin-Resolved Structure of Valence Band in Epitaxial Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (111) Films  
Workshop on Applications of Synchrotron Light to Magnetic Materials  
Campinas (Brazil) August, 2000
- [27] H.Fujioka, S.Katsumoto and Y.Iye  
Detection of Edge Conducting Channel in Quantum Hall Systems by Single Electron Transistor  
2000 Int. Symp. on Formation, Physics and Device Application of Quantum Dot Structures Sapporo, September, 2000
- [28] Fumio Komori  
Growth of Ferromagnetic Dot Arrays on Cu(001) c(2x2)N Surfaces  
2000 Int. Conf. on Surfaces and Interfaces  
Nagoya, October, 2000
- [29] Y.Naito, K.Nakatsuji and F.Komori  
STM Observation of Low Coverage Ag on Ge(001) Surface  
2000 Int. Conf. on Surfaces and Interfaces  
Nagoya, October, 2000
- [30] A.Endo, M.Kato, M.Kawamura, M.Ando, S.Katsumoto and Y.Iye  
Two-Dimensional Electrons in Spatially Inhomogeneous Magnetic Field  
The 8th NEC Int. Symp. on Spin-Related Quantum Transport in Mesoscopic Systems  
Nasu, October, 2000)
- [31] S.Katsumoto, T.Hayashi, Y.Hashimoto, Y.Iye, Y.Ishiwata, R.Eguchi, S.Shin, K.Hirakawa, M.Watanabe, Y.Harada, and T.Takeuchi  
Magnetism and Metal-Insulator Transitions in III-V Based Diluted Magnetic Semiconductors  
The 8th NEC Int. Symp. on Spin-Related Quantum Transport in Mesoscopic Systems  
Nasu, October, 2000
- [32] F.Komori and K.Nakatsuji  
Quantized Conductance through Iron Point Contacts  
The 8th NEC Int. Symp. on Spin-Related Quantum Transport in Mesoscopic Systems  
Nasu, October, 2000
- [33] F.Komori  
Growth and Magnetism of Ferromagnetic Nano-Dots Squarely Arranged on Cu(001)-c(2x2)N Surfaces  
Workshop of Int. Union of Vacuum Science and Technology  
Kushiro, January, 2001
- [34] F. Komori, M. Xu, T. Iimori, K.D. Lee, M. Yamada and K. Nakatsuji  
Cs adsorbed Structure and Change of Magnetism in fcc Co Thin Films Grown on Cu(001) Surfaces,  
11th International Conference on Solid Surfaces  
San Francisco (U.S.A), October, 2001

- [35] Y. Q. Cai, K. Nakatsuji, S. Ohno, T. Iimori, M. Yamada and F. Komori  
Direct Evidence for an Itinerant Magnetite Above and Below the Verwey  
Transition Temperature,  
The 13th International Conference on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics  
Trieste (Italy), July 23-27, 2001
- [36] Y.Iye, M.Kato, M.Ando, A.Endo and S.Katsumoto  
Transport in Two-Dimensional Electron Gas under a Spatially Modulated Magnetic  
Field  
International Symposium on Nanoscale Magnetism and Transport (INMT-2000)  
Sendai, March 8-10, 2000
- [37] T.Hayashi, Y.Hashimoto, S.Katsumoto and Y.Iye  
Metal-Insulator Transition and Magnetotransport in III-V Compound Diluted Magnetic  
Semiconductors  
International Symposium on Advanced APF-5  
Tsukuba, December, 2000
- [38] S.Katsumoto, T.Hayashi, Y.Hashimoto, Y.Iye, Y.Ishiwata, M.Watanabe, R.Eguchi,  
T.Takeuchi, Y.Harada, S.Shin, and K.Hirakawa  
Nature of Magnetism in III-V based Diluted Magnetic Semiconductors  
The 10th International Conference on Narrow Gap Semiconductors (NGS-10)  
Kanazawa, May, 2001
- [39] Y.Iye, A.Endo, S. Katsumoto, Y. Ohno, S. Shimomura and S. Hiyamizu  
Magnetotransport in Short Period Lateral Superlattices  
The 10th International Conference on Narrow Gap Semiconductors (NGS-10)  
Kanazawa, May, 2001
- [40] A.Endo, M.Kawamura, S.Katsumoto and Y.Iye  
Magnetotransport of Unidirectional Lateral Superlattice around Half-Odd Filling of  
Landau Levels  
The 14th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems  
Praha (Czech), August, 2001
- [41] Y.Iye, A.Endo, S. Katsumoto, Y. Ohno, S. Shimomura and S. Hiyamizu  
Quantum Transport in Two-Dimensional Electron Gas in Ultra-Short Period Lateral  
Superlattices  
The 7th International Symposium on the Foundations of Quantum Mechanics in the  
Light of New Technology (ISQM-Tokyo-01)  
Hatoyama, August, 2001.
- [42] Y.Iye, A.Endo, S. Katsumoto, Y. Ohno, S. Shimomura and S. Hiyamizu  
Suppression of Exchange Enhancement of Spin Gap in Quantum Hall Systems by  
Ultra-Short Period Lateral Superlattice  
The 8th ISSP International Symposium on Correlated Electrons (ISSP-Kashiwa 2001)  
Kashiwa, October, 2001
- [43] Y.Iye  
Quantum Hall States in Short Period Lateral Superlattices  
Workshop on Quantum Transport in Nanoscopic and Mesoscopic Structures  
Taiwan, November, 2001
- [44] F.Komori  
Magnetism of Ferromagnetic Nano-dots Squarely Arranged on Cu(001)-c(2x2)N  
Surfaces  
Workshop on Quantum Transport in Nanoscopic and Mesoscopic Structures  
Taiwan, November, 2001

- [45] K.Nakatsuji  
Quantized Conductance through Iron Point Contacts  
Workshop on Quantum Transport in Nanoscopic and Mesoscopic Structures  
Taiwan, November, 2001
- [46] K.Kobayashi, H.Ailkawa, S.Katsumoto and Y.Iye  
Reduction of Quantum Decoherence in Non-Local Resistance Measurement  
International Workshop on New Phenomena in Mesoscopic Structures (Hawaii, Nov. 2001)
- [47] F. Komori  
Magnetism of Ferromagnetic Nano-Dots Squarely Arranged on Cu(001)-c(2x2)N Surfaces  
Yamada Conference LVII on Atomic-Scale Surface Designing for Functional Low-Dimensional Materials  
Tsukuba, November, 2001

【ポスター発表】

- [1] M.Hirasawa, S.Katsumoto and Y.Iye,  
Coulomb Blockade in Arrays of Quantum Dots,  
The 12th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-12)  
Tokyo, September, 1997
- [2] M.Ando, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye,  
Conduction Through Point Contact in Fractional Quantum Hall Liquid,  
The 12th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-12)  
Tokyo, September, 1997
- [3] T. Takamasu, G. Kido, M. Ohno, N. Miura, A. Endo, M. Kato, S. Katsumoto and Y. Iye,  
Possible Explanation of the High Temperature Extrapolated Value of Diagonal Resistivity at  $\nu=1$  in terms of Skyrmion,  
The 12th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-12)  
Tokyo, September, 1997
- [4] M.Kawamura, A.Endo, M.Hirasawa, S.Katsumoto and Y.Iye,  
Angular Dependent Magnetoresistance Oscillation in GaAs/AlGaAs Superlattice,  
The 12th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-12)  
Tokyo, September, 1997
- [5] M.Kato, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye  
Strain-Induced Potential Modulation versus Magnetic Field Modulation on Two-Dimensional Electron Gas at the GaAs/AlGaAs Heterointerface,  
The 12th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-12)  
Tokyo, September, 1997
- [6] H.Sato, S.Katsumoto, and Y.Iye,  
Non-Invasive Measurements of Mesoscopic Superconductors by Superconducting Single Electron Transistors,  
Nanostructure Physics and Electronics (NPE'97)  
Tokyo, September, 1997.
- [7] M.Kato, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye,  
Control of Magnetic Field Modulation on Two-Dimensional Electron Gas at the GaAs/AlGaAs Heterointerface by Parallel Magnetic Field,  
Nanostructure Physics and Electronics (NPE'97)

- Tokyo, September, 1997.
- [8] M.Ando, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye,  
Detection of Fractional Edge Channel by Quantum Point Contacts,  
Nanostructure Physics and Electronics (NPE'97)  
Tokyo, September, 1997.
- [9] A.Oiwa, A.Endo, S.Katsumoto, Y.Iye and H.Munekata  
Anomalous Giant Barkhausen Jumps in III-V-Based Diluted Magnetic Semiconductor  
(In,Mn)As at Low Temperatures,  
The 6th International Symposium on the Foundations of Quantum Mechanics in the  
Light of New Technology (ISQM-Tokyo-98) (Hatoyama, Aug. 1998)
- [10] K.Mukai, Y.Matsumoto, K.Tanaka, F.Komori  
STM Study of Co Thin Films on c(2X2)-N/Cu(100) Surface,  
International Symposium on Surfaces and Interfaces (Tokyo, Nov. 1998)
- [11] Y.Oikawa, T.Takamasu, G.Kido, A.Endo, M.Kato, S.Katsumoto and Y.Iye  
Effect of the Inner Current Contact in Quantum Hall Regime,  
International Symposium on Advanced Physical Fields, (Tsukuba, Feb. 1999)
- [12] T.Hayashi, S.Katsumoto, Y.Hashimoto, M.Zalalutdinov, M.Kawamura, A.Endo and  
Y.Iye:  
Magnetism and Magnetoelectric Transport in (Ga,Mn)As  
Int. Conf. Localization '99, Hamburg, Germany (August, 1999)
- [13] Y.Hashimoto, S.Katsumoto, M.Murayama and Y.Iye:  
Direct Measurement of Spin Diffusion Length using Spin Valve  
Int. Conf. Localization '99, Hamburg, Germany (August, 1999)
- [14] A.Oiwa, A.Endo, S.Katsumoto, Y.Iye and H.Munekata:  
Magnetic-Field-Induced Metal-Insulator Transition in (In,Mn)As  
Int. Conf. Localization '99,  
Hamburg, (Germany) August, 1999
- [15] M.Kawamura, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye  
Non-Ohmic Vertical Transport in Multilayered Quantum Hall Systems  
The 13th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems  
Ottawa (Canada), August, 1999
- [16] M.Kato, M.Sakairi, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye  
Electron-Electron Scattering in Two-Dimensional Electron Gas under a Controllable  
Spatially Modulated Magnetic Field  
The 13th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems  
Ottawa (Canada), August, 1999
- [17] Mayumi Kato, Makoto Sakairi, Akira Endo, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye  
Electron-Electron Umklapp Scattering in Two-Dimensional Electron Gas under Lateral  
Magnetic Periodicity  
The 22th Int. Conf. on Low Temperature Physics, (LT22)  
Helsinki (Finland) August, 2000
- [18] Masato Ando, Akira Endo, Shingo Katsumoto, Yasuhiro Iye  
Transport in Two-Dimensional Electron Gas in Inhomogeneous Magnetic Field  
The 22th Int. Conf. on Low Temperature Physics, (LT22)  
Helsinki (Finland) August, 2000
- [19] Maxim Zalalutdinov, Hiroyuki Fujioka, Yoshiaki Hashimoto, Shingo Katsumoto,  
Yasuhiro Iye  
Vortex States in Microfabricated Superconducting Disk Probed by Tunneling  
Spectroscopy



- The 22th Int. Conf. on Low Temperature Physics, (LT22)  
Helsinki (Finland) August, 2000
- [20] Yoshiaki Hashimoto, Shingo Katsumoto, Chizuko Murayama, Yasuhiro Iye  
Spin Diffusion Length and Giant Magnetoresistance in Spin-Valve Tri-layers  
The 22th Int. Conf. on Low Temperature Physics, (LT22)  
Helsinki (Finland) August, 2000
- [21] Takashi Hayashi, Shingo Katsumoto, Yoshiaki Hashimoto, Akira Endo, Minoru Kawamura, Maxim Zalalutdinov and Yasuhiro Iye  
Anisotropy and Barkhausen Jumps in Diluted Magnetic Semiconductor (Ga,Mn)As  
The 22th Int. Conf. on Low Temperature Physics, (LT22)  
Helsinki (Finland) August, 2000
- [22] A.Oiwa, A.Endo, S.Katsumoto, Y.Iye and H.Munekata  
Staircase-like Hysteresis Loop in III-V Compound Diluted Magnetic Semiconductor (In,Mn)As at Low Temperatures  
The 22th Int. Conf. on Low Temperature Physics, (LT22)  
Helsinki (Finland) August, 2000
- [23] M.Kawamura, A.Endo, S.Katsumoto, Y.Iye, C.Terakura and S.Uji  
Quantum Hall Effect in Semiconductor Superlattice in a Tilted Magnetic Field  
14th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics  
Matsue, September, 2000
- [24] M.Kato, A.Endo, M.Salairi, M.Hara, S.Katsumoto and Y.Iye  
Quantitative Evaluation of Electron-Electron Scattering Rate in Two-Dimensional Electron Gas by Magnetic Lateral Superlattice  
The 25th Int. Conf. on Physics of Semiconductors  
Osaka, September, 2000
- [25] J.Wakabayashi, A.Tamagawa, T.Ishikawa, T.Mochiku, K.Hirata, A.Endo and Y.Iye  
Spin-Sensitive Temperature Dependence of the Hall Resistance in the Quantum Hall Regime under a Distributed Magnetic Field  
The 25th Int. Conf. on Physics of Semiconductors  
Osaka, September, 2000
- [26] T.Hayashi, Y.Hashimoto, S.Yoshida, S.Katsumoto and Y.Iye  
Magnetic-Field-Driven Metal-Insulator Transition in Magnetic Semiconductor (Ga,Mn)As  
The 25th Int. Conf. on Physics of Semiconductors  
Osaka, September, 2000
- [27] M.Hara, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye  
Transport in Semiconductor/Ferromagnet Hybrid Systems  
The 10th International Conference on Narrow Gap Semiconductors (NGS-10)  
Kanazawa, May, 2001
- [28] Y.H.Matsuda, T.Ikaida, N.Miura, Y.Hashimoto, S.Katsumoto, J.Kono, M.A.Zudov and H.Munekata  
Hole Cyclotron Resonance in  $\text{In}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$   
The 10th International Conference on Narrow Gap Semiconductors (NGS-10)  
Kanazawa, May, 2001
- [29] M.Hara, A.Endo, S.Katsumoto, and Y.Iye  
Magnetotransport in 2DEG with Magnetic Barriers  
The 14th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems  
Praha (Czech), August, 2001

- [30] Y.Iye, A.Endo, S.Katsumoto, Y.Ohno, S.Shimomura and S.Hiyamizu  
Magnetotransport in Ultrashort Period Unidirectional Lateral Superlattices  
The 14th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems  
Praha (Czech), August, 2001
- [31] K.Kobayashi, H.Aikawa, S.Katsumoto and Y.Iye  
Observation-Dependent Decoherence in an Aharonov-Bohm Effect  
The 7th International Symposium on the Foundations of Quantum Mechanics in the  
Light of New Technology (ISQM-Tokyo-01)  
Hatoyama, August, 2001.
- [32] T.Hayashi, Y.Hashimoto, S.Katsumoto and Y.Iye  
Metal-Insulator Transition in (Ga,Mn)As  
The 8th ISSP International Symposium on Correlated Electrons (ISSP-Kashiwa 2001)  
Kashiwa, October, 2001
- [33] H.Fujioka, A.Endo, S.Katsumoto and Y.Iye  
Observation of Edge States in Fractional Quantum Hall Effect  
The 8th ISSP International Symposium on Correlated Electrons (ISSP-Kashiwa 2001)  
Kashiwa, October, 2001
- [34] K.Kobayashi, H.Aikawa, S.Katsumoto and Y.Iye  
Observation of an Enhanced Aharonov-Bohm Effect  
The 8th ISSP International Symposium on Correlated Electrons (ISSP-Kashiwa 2001)  
Kashiwa, October, 2001
- [35] T. Iimori, M. Xu, M. Yamada, K. Nakatsuji, K.D. Lee and F. Komori  
Cs Adsorbed Structure and Change of Magnetism in fcc Co Thin Films Grown on  
Cu(001) Surfaces  
Yamada Conference LVII on Atomic-Scale Surface Designing for Functional  
Low-Dimensional Materials  
Tsukuba, Nov. 2001

国内会議発表 (99件)

- [1] 小森文夫, 岩城 孝雄, 服部 賢, 椎野 修, 長谷川 哲也  
NbSe<sub>2</sub> 表面微小不純物近傍の超伝導近接効果  
日本物理学会 (名城大学, 平成9年3月)
- [2] 大岩 顕, 勝本 信吾, 遠藤 彰, 平澤 正勝, 家 泰弘, 大野 英男, 沈 愛東,  
松倉 文礼, 菅原 靖宏  
Ga<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As/GaAs における巨大な負の磁気抵抗  
日本物理学会 (名城大学, 平成9年3月)
- [3] 勝本 信吾, 大岩 顕, 遠藤 彰, 平澤 正勝, 家 泰弘, 大野 英男, 沈 愛東,  
松倉 文礼, 菅原 靖宏  
Ga<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>As/GaAs におけるホッピング伝導  
日本物理学会 (名城大学, 平成9年3月)
- [4] 服部 賢, 岩城 孝雄, 小森文夫, 飯盛 拓嗣  
NbSe<sub>2</sub> 表面の低温 STM/STS 観察  
日本物理学会 (名城大学, 平成9年3月)
- [5] 佐藤 秀樹, 勝本 信吾, 家 泰弘  
メゾスコピック系の超伝導体における磁気指紋  
日本物理学会 (名城大学, 平成9年3月)
- [6] 加藤 真由美, 遠藤 彰, 平澤 正勝, 勝本 信吾, 家 泰弘  
周期的磁場変調下の2次元電子系の磁気抵抗振動  
日本物理学会 (名城大学, 平成9年3月)

- [7] 安藤 正人, 遠藤 彰, 勝本 信吾, 家 泰弘  
分数量子ホール状態におけるポイントコンタクト  
日本物理学会(名城大学, 平成9年3月)
- [8] 高増 正, 大野 実, 三浦 登, 加藤 真由美, 遠藤 彰, 勝本 信吾, 家 泰弘,  
寺嶋 太一, 青木 晴善, 木戸 義勇  
奇整数量子ホール効果状態におけるエネルギーギャップの磁場依存性  
日本物理学会(名城大学, 平成9年3月)
- [9] 平澤 正勝, 勝本 信吾, 遠藤 彰, 家 泰弘  
量子ドット2次元アレイの電気伝導  
日本物理学会(名城大学, 平成9年3月)
- [10] 安藤 正人, 遠藤 彰, 勝本 信吾, 家 泰弘  
ポイントコンタクトをもつ2次元電子系の量子ホール効果  
日本物理学会(神戸大学, 平成9年9月)
- [11] 高増 正, 木戸 義勇, 大野 実, 三浦 登, 加藤 真由美, 遠藤 彰, 勝本 信吾,  
家 泰弘  
奇整数量子ホール効果状態における磁気抵抗の温度依存性  
日本物理学会(神戸大学, 平成9年9月)
- [12] 大岩 顕, 勝本 信吾, 遠藤 彰, 平澤 正勝, 家 泰弘, 大野 英男, 沈 愛東,  
松倉 文礼  
 $Ga_{1-x}Mn_xAs/GaAs$  の圧力効果  
日本物理学会(神戸大学, 平成9年9月)
- [13] 勝本 信吾, 大岩 顕, 遠藤 彰, 平澤 正勝, 家 泰弘, 大野 英男, 沈 愛東,  
松倉 文礼, 菅原 靖宏  
 $Ga_{1-x}Mn_xAs/GaAs$  におけるホッピング伝導(2)  
日本物理学会(神戸大学, 平成9年9月)
- [14] 平澤 正勝, 勝本 信吾, 遠藤 彰, 家 泰弘  
量子ドット2次元アレイの電気伝導  
日本物理学会(神戸大学, 平成9年9月)
- [15] 加藤 真由美, 遠藤 彰, 平澤 正勝, 勝本 信吾, 家 泰弘  
2次元電子系における平行磁場をもちいた磁場変調の制御  
日本物理学会(神戸大学, 平成9年9月)
- [16] 遠藤 彰, 勝本 信吾, 家 泰弘  
自然成長微粒子をのせた2次元電子系の磁気輸送  
日本物理学会(神戸大学, 平成9年9月)
- [17] 川村 稔, 遠藤 彰, 平澤 正勝, 勝本 信吾, 家 泰弘  
大きく膨らんだ擬2次元フェルミ面での角度依存磁気抵抗振動  
日本物理学会(神戸大学, 平成9年9月)
- [18] 植田 正輝, 首藤 健一, 服部 賢, 小森 文夫  
光照射下における塩素吸着Si(111)面のSTMを用いた観察  
日本物理学会(神戸大学, 平成9年9月)
- [19] 折戸 朗子, 福島 昭子, 平澤 正勝, 勝本 信吾, 家 泰弘  
超伝導/強磁性複合膜の特性  
日本物理学会(神戸大学, 平成9年9月)
- [20] 遠藤 彰, 勝本 信吾, 家 泰弘  
2つのサブバンドが占有されたGaAs/AlGaAs単一ヘテロ接合の量子ホール効果  
日本物理学会(東邦大学, 平成10年4月)
- [21] 加藤 真由美, 遠藤 彰, 勝本 信吾, 家 泰弘  
周期的金属ゲートが2次元電子系に与えるポテンシャル変調  
日本物理学会(東邦大学, 平成10年4月)
- [22] 佐藤 秀樹, 勝本 信吾, 家 泰弘

- 微小超伝導体中の磁束の状態  
日本物理学会（東邦大学，平成10年4月）
- [23] 小森 文夫，岩城 隆雄，新井 紳太郎，服部 賢  
NbSe<sub>2</sub>表面鉄微粒子近傍における対破壊効果の観察  
日本物理学会（日本大学，平成10年4月）
- [24] 川村 稔，遠藤 彰，勝本 信吾，家 泰弘  
多層量子ホール系の垂直伝導  
日本物理学会（琉球大学，平成10年9月）
- [25] 加藤 真由美，坂入 誠，遠藤 彰，勝本 信吾，家 泰弘  
周期的磁場変調下の2次元電子系における電子電子散乱の温度依存性  
日本物理学会（琉球大学，平成10年9月）
- [26] 林 岳，橋本 義昭，大岩 顕，勝本 信吾，家 泰弘，沈 愛東，松倉 文礼  
大野 英男，(Ga, Mn)Asにおける異方性磁気抵抗およびバルクハウゼンジャンプ  
日本物理学会（琉球大学，平成10年9月）
- [27] 橋本 義昭，勝本 信吾，家 泰弘  
Fe/Cu/Ni 薄膜の磁気抵抗の温度依存性と微細化の効果，  
日本物理学会（琉球大学，平成10年9月）
- [28] 家 泰弘，伊藤 優，安藤 正人，村山 千寿子，橋本 義昭，勝本 信吾，  
微細構造をもつ超伝導 / 強磁性複合膜の特性  
日本物理学会（琉球大学，平成10年9月）
- [29] 向井 孝三，松本 祐司，田中 虔一，小森 文夫  
c(2X2)-N/Cu(100)面上のCo 薄膜のSTM 観察，  
日本物理学会（琉球大学，平成10年9月）
- [30] 飯盛 拓嗣，Yong Qiang Cai，山田 正理，服部 賢，小森 文夫  
強磁性超薄膜の磁気光学効果の測定  
日本物理学会（琉球大学，平成10年9月）
- [31] 大岩 顕，勝本 信吾，家 泰弘，宗片 比呂夫  
希薄磁性半導体(In, Mn)Asの低温における巨大バルクハウゼン効果，  
日本物理学会（琉球大学，平成10年9月）
- [32] 遠藤 彰，勝本 信吾，家 泰弘  
短周期1次元変調を加えた2次元電子系の磁気輸送  
日本物理学会（広島大学，平成11年3月）
- [33] 川村 稔，遠藤 彰，勝本 信吾，家 泰弘  
斜め磁場中における多層量子ホール系の垂直伝導  
日本物理学会（広島大学，平成11年3月）
- [34] 安藤 正人，遠藤 彰，勝本 信吾，家 泰弘  
2次元周期磁場中の2次元電子の磁気伝導  
日本物理学会（広島大学，平成11年3月）
- [35] 藤岡 博幸，Maxim Zalalutdinov，佐藤 秀樹，橋本 義昭，家 泰弘，勝本 信吾  
微小超伝導体の磁束状態  
日本物理学会（広島大学，平成11年3月）
- [36] 家 泰弘  
半導体におけるスピン制御量子輸送，  
日本物理学会（広島大学，平成11年3月）
- [37] 勝本 信吾，大岩 顕，林 岳，家 泰弘，大野 英男，腰原 伸也，宗片 比呂夫  
低温における - 族希薄磁性半導体の電気伝導，  
日本物理学会（広島大学，平成11年3月）
- [38] 家 泰弘  
人工磁気周期構造による変調を受けた2次元電子系  
日本物理学会（広島大学，平成11年3月）

- [39] 藤木 貴子, 佐藤 秀樹, 勝本 信吾, 家 泰弘  
微小リングを含むdc-SQUIDの磁場応答  
日本物理学会 (広島大学, 平成 11 年 3 月)
- [40] 飯盛拓嗣, Lee Ki-Dong, Y.C.Cai, 小森文夫  
コバルト超薄膜の磁気光学効果の測定  
日本物理学会 (広島大学, 平成 11 年 3 月)
- [41] 新井紳太郎, 中辻寛, 大野真也, 小森文夫  
Fe蒸着BSCCO表面におけるSTS  
日本物理学会 (広島大学, 平成 11 年 3 月)
- [42] 飯盛 拓嗣, Lee Ki-Dong, 小森 文夫  
N/Cu(001)面上のコバルト微細構造の強磁性測定  
日本物理学会 (岩手大学, 平成 11 年 9 月)
- [43] 中辻 寛, 小森 文夫  
Fe 細線の量子化コンダクタンス  
日本物理学会 (岩手大学, 平成 11 年 9 月)
- [44] 大野 真也, 中辻 寛, Ki-Dong Lee, 飯盛 拓嗣, 小森 文夫  
N-Cu(001)表面における Fe, Co, Ni の超薄膜構造  
日本物理学会 (岩手大学, 平成 11 年 9 月)
- [45] 橋本 義昭, 勝本 信吾, 家 泰弘  
GaMnAs/GaAs pn 接合の特性  
日本物理学会 (岩手大学, 平成 11 年 9 月)
- [46] 林 岳, 橋本 義昭, 家 泰弘, 勝本 信吾  
(GaMn)As の成長面内における磁気異方性  
日本物理学会 (岩手大学, 平成 11 年 9 月)
- [47] 藤岡 博幸, 遠藤 彰, 勝本 信吾, 家 泰弘  
分数量子ホール状態の 2 次元電子系のエッジ状態  
日本物理学会 (岩手大学, 平成 11 年 9 月)
- [48] 川村 稔, 遠藤 彰, 勝本 信吾, 家 泰弘  
多層量子ホール系における横磁場の効果  
日本物理学会 (岩手大学, 平成 11 年 9 月)
- [49] 伊藤 優, 安藤 正人, 勝本 信吾, 家 泰弘  
空間変調磁場中の超伝導ネットワーク  
日本物理学会 (岩手大学, 平成 11 年 9 月)
- [50] 加藤 真由美, 遠藤 彰, 勝本 信吾, 家 泰弘  
周期的磁場変調下の 2 次元電子系における Umklapp 散乱の効果  
日本物理学会 (岩手大学, 平成 11 年 9 月)
- [51] 安藤 正人, 遠藤 彰, 勝本 信吾, 家 泰弘  
ランダム磁場中の 2 次元電子の電気伝導  
日本物理学会 (岩手大学, 平成 11 年 9 月)
- [52] 小森 文夫  
鉄ナノワイヤーの量子化コンダクタンス  
第 12 回佐々木学術シンポジウム (筑波大学, 平成 11 年 12 月)
- [53] 林 岳, 橋本 義昭, 勝本 信吾, 家 泰弘  
(Ga, Mn)As の磁場による金属絶縁体転移  
日本物理学会 (関西大学, 平成 12 年 3 月)
- [54] 遠藤 彰, 勝本 信吾, 家 泰弘  
1 次元変調を加えた 2 次元電子系における整合性磁気抵抗振動の包絡関数  
日本物理学会 (関西大学, 平成 12 年 3 月)
- [55] 勝本 信吾  
単電子素子に現れるコヒーレンス

- 日本物理学会（関西大学,平成12年3月）
- [56] Ki-Dong Lee, 飯盛 拓嗣, 中辻 寛, 小森 文夫  
窒素吸着 Cu(001)面上の Co 微小ドット 2次元配列の磁性  
日本物理学会（関西大学,平成12年3月）
- [57] 飯盛 拓嗣, Ki-Dong Lee, 小森 文夫  
セシウム吸着による遷移金属超薄膜の磁性の変化  
日本物理学会（関西大学,平成12年3月）
- [58] 大野 真也, 中辻 寛, 飯盛 拓嗣, 小森 文夫  
Fe,Co 吸着 N/Cu(001)表面の STM 観察  
日本物理学会（関西大学,平成12年3月）
- [58] 石渡 洋一, 江口 律子, 原田 慈久, 辛 殖, 橋本 義昭, 勝本 信吾, 家 泰弘,  
竹内 智之, 渡邊 正満  
軟 X 線吸収・発光分光による (Ga,Mn)As の組成比依存性の研究  
日本物理学会（関西大学,平成12年3月）
- [59] 林 岳, 橋本 義昭, 勝本 信吾, 家 泰弘  
(Ga,Mn)As の磁場による金属絶縁体転移  
日本物理学会（関西大学,平成12年3月）
- [60] 遠藤 彰, 勝本 信吾, 家 泰弘  
1次元変調を加えた2次元電子系における整合性磁気抵抗振動の包絡関数  
日本物理学会（関西大学,平成12年3月）
- [61] 久我 剛, 岡本 徹, 川路 紳治, 遠藤 彰, 家 泰弘  
分数量子ホール効果の高精度測定  
日本物理学会（関西大学,平成12年3月）
- [62] 大野 真也, 中辻 寛, 飯盛 拓嗣, 小森 文夫  
N/Cu(001)-c(2×2)表面上の鉄ドットの成長  
P F 研究会（物質構造科学研究所,平成12年5月）
- [63] 小森 文夫  
N/Cu 上 Co 磁性ドット  
P F 研究会（物質構造科学研究所,平成12年5月）
- [64] 小森 文夫  
ナノ構造強磁性薄膜  
「原子尺度の表面デザイン」研究会（東大物性研,平成12年6月）
- [65] 小森 文夫  
ナノ構造強磁性薄膜  
新プロ表面界面討論会（パストラル松風苑,平成12年6月）
- [66] 小森 文夫  
磁性体接合と量子化コンダクタンス  
日本物理学会（新潟大学,平成12年9月）
- [67] 中西寛, 笠井秀明, 興地斐男, 小森文夫  
磁性体原子架橋の構造, 磁性, 伝導性  
日本物理学会（新潟大学,平成12年9月）
- [68] 石渡 洋一, 渡邊 正満, 江口 律子, 竹内 智之, 原田 慈久, 橋本 義昭,  
勝本 信吾, 家 泰弘, 辛 殖  
(Ga,Mn)As の軟 X 線発光分光  
日本物理学会（新潟大学,平成12年3月）
- [69] 遠藤 彰, 川村 稔, 勝本 信吾, 家 泰弘  
短周期1次元平面超格子の半奇数充填率近傍での磁気伝導  
日本物理学会（新潟大学,平成12年3月）
- [70] 中辻 寛, 大野 真也, 飯盛 拓嗣, 山田 正理, 小森 文夫, Y.Q.Cai  
Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (111)薄膜のスピン分解光電子分光

- 日本物理学会（新潟大学，平成12年9月）
- [71] 大野 真也，Y.Q.Cai，中辻 寛，飯盛 拓嗣，山田 正理，小森 文夫  
Pt(111)表面上の $\text{Fe}_3\text{O}_4$ (111)薄膜の成長とバンド構造  
日本物理学会（新潟大学，平成12年9月）
- [72] 内藤 賀公，中辻 寛，小森 文夫  
Ge(001)表面上のAgの初期吸着構造のSTM観察  
日本物理学会（新潟大学，平成12年9月）
- [73] 家 泰弘  
半導体のスピンはどこまで制御できるか？  
大学と科学公開シンポジウム（大阪千里ライフサイエンスセンター，平成12年11月）
- [74] 小森 文夫  
強磁性原子細線の量子化コンダクタンス  
第11回ナノ磁性体研究会，（東京，平成13年2月）
- [75] 家 泰弘  
人工周期構造下の2次元電子系  
第13回佐々木シンポジウム（学習院大，平成13年1月）
- [76] 家 泰弘  
磁性半導体研究の新展開 インTRODクシヨソ  
日本物理学会（中央大学多摩校舎，平成13年3月）
- [77] 藤岡 博幸，遠藤 彰，家 泰弘，勝本 信吾  
分数量子ホール効果のエッジ状態の単電子トランジスタによる検出  
日本物理学会（中央大学多摩校舎，平成13年3月）
- [78] 原 正大，遠藤 彰，勝本 信吾，家 泰弘  
磁気バリアのある2次元電子系における伝導  
日本物理学会（中央大学多摩校舎，平成13年3月）
- [79] 家 泰弘，遠藤 彰，川村 稔，勝本 信吾，大野 恭秀，下村 哲，冷水 佐壽  
短周期1次元平面超格子中の2次元電子系における磁気抵抗ゆらぎ  
日本物理学会（中央大学多摩校舎，平成13年3月）
- [80] 遠藤 彰，家 泰弘  
平面超格子の半奇数充填率近傍での伝導  
日本物理学会（中央大学多摩校舎，平成13年3月）
- [81] 中西 寛，笠井 秀明，興地 斐男，小森 文夫  
梯子構造の鉄原子架橋の磁性  
日本物理学会（中央大学多摩校舎，平成13年3月）
- [82] 大野 真也，中辻 寛，小森 文夫  
c(2x2)-N/Cu(001)表面における遷移金属超薄膜の成長  
日本物理学会（中央大学多摩校舎，平成13年3月）
- [83] 飯盛 拓嗣，Ki-Dong Lee，Ming-Chun Xu，小森 文夫  
銅(001)面上のコバルト超薄膜磁性のセシウム吸着効果  
日本物理学会（中央大学多摩校舎，平成13年3月）
- [84] 中辻寛，山田正理，大野真也，内藤賀公，飯盛拓嗣，小森文夫，奥田太一，  
原沢あゆみ，木下豊彦  
Ge(001)表面上のAg薄膜の電子状態  
日本物理学会（中央大学多摩校舎，平成13年3月）
- [85] 石渡 洋一，竹内 智之，渡邊 正満，原田 慈久，辛 殖，林 岳，橋本 義昭，  
勝本 信吾，家 泰弘  
(In,Mn)Asの軟X線吸収・発光分光  
日本物理学会（中央大学多摩校舎，平成13年3月）
- [86] 中辻寛，山田正理，大野真也，内藤賀公，飯盛拓嗣，小森文夫，奥田太一，



- 原沢あゆみ, 木下豊彦  
Ge(001)面上の銀薄膜の成長：二次元成長と三次元島成長  
日本化学会（神戸，平成13年3月）
- [87] 家 泰弘, 遠藤 彰, 勝本 信吾, 大野 恭秀, 下村 哲, 冷水 佐壽  
短周期ポテンシャル変調による量子ホール系のスピングャップの抑制  
日本物理学会（徳島文理大学，平成13年9月）
- [88] 勝本 信吾  
10qubits は可能か？ 量子計算の実現に向けて  
日本物理学会（徳島文理大学，平成13年9月）
- [89] 遠藤 彰, 家 泰弘  
正方形試料を用いた1次元平面超格子の抵抗異方性の研究  
日本物理学会（徳島文理大学，平成13年9月）
- [90] 小林 研介, 相川 恒, 勝本 信吾, 家 泰弘  
測定法に依存する電子のコヒーレンス  
日本物理学会（徳島文理大学，平成13年9月）
- [91] 林 岳, 橋本 義昭, 勝本 信吾, 家 泰弘  
(Ga, Mn)As の磁場による金属絶縁体転移  
日本物理学会（徳島文理大学，平成13年9月）
- [92] 藤岡 博幸, 遠藤 彰, 家 泰弘, 勝本 信吾  
分数量子ホール効果のエッジチャンネルの単電子トランジスタによる検出  
日本物理学会（徳島文理大学，平成13年9月）
- [93] 原 正大, 遠藤 彰, 勝本 信吾, 家 泰弘  
磁気バリア中2次元電子系の磁気輸送  
日本物理学会（徳島文理大学，平成13年9月）
- [94] 相川 恒, 小林 研介, 勝本 信吾, 家 泰弘  
静電的な AB 位相制御  
日本物理学会（徳島文理大学，平成13年9月）
- [95] 小原 顕, 都築 慶和, 若林 淳一, 遠藤 彰, 家 泰弘  
単一微小 Ni ディスク付き GaAs/AlGaAs ヘテロ界面二次元電子系の共鳴的巨磁気抵抗  
日本物理学会（徳島文理大学，平成13年9月）
- [96] 小森 文夫, 飯盛 拓嗣, 徐 明春, 李 起東  
Cs 吸着 fccCo(001)薄膜の磁気異方性変化  
日本物理学会（徳島文理大学，平成13年9月）
- [97] 中辻 寛, 山田 正理, 大野 真也, 内藤 賀公, 飯盛 拓嗣, 小森 文夫  
Ge(001)表面上の Ag 薄膜の電子状態  
日本物理学会（徳島文理大学，平成13年9月）
- [98] 石渡 洋一, 竹内 智之, 渡邊 正満, 原田 慈久, 辛 殖, 林 岳, 橋本 義昭,  
勝本 信吾, 家 泰弘  
(In, Mn)As の軟 X 線吸収・発光分光  
日本物理学会（徳島文理大学，平成13年9月）
- [99] 小林 研介  
AB 効果における電子の位相制御とコヒーレンス 低次元ナノ構造体の物理  
第14回佐々木シンポジウム（理化学研究所，平成13年11月）

(3)特許出願（国内1件，海外0件）

国内

発明者： 勝本信吾，家泰弘，林岳，橋本義昭

発明の名称： 磁性半導体薄膜の製造方法

出願人： 川崎雅弘

出願番号：

出願日： 平成12年9月13日

(4)新聞報道等

該当なし

(5)その他特記事項

本プロジェクトで，表面自己形成を利用した高密度磁性ドットアレイの作製とその特徴的磁性を明らかにした．それを基礎として，磁気記録媒体への応用を目指す研究が小森研とNHK技研との共同研究として進行中である．

## 7. 結び

本研究プロジェクトを通じて、研究統括の川路紳治先生をはじめとしてアドバイザーの先生方から多大のご支援と激励を賜りました。ご期待に十分沿うことができたかどうか心もとない点もありますが、5年間思う存分に研究を楽しませていただきました。その中から多くの若い人たちが成長していったことは代表者として大きな喜びです。三上さん、玉井さんをはじめとして目白事務所の方々、また科学技術振興事業団本部の方々には大変お世話になりました。書類不備などでご迷惑をおかけしたことも何度かありましたが、改めてお詫び申し上げますとともに、この間のご支援に篤く御礼申し上げます。

本プロジェクトの遂行過程のいろいろな局面で、チーム外の多くの研究者にもご協力いただきました。ここにお名前（敬称略）を挙げて感謝の意を表します。

【物性研究所】福山 秀敏，佐々木 貴彦，安藤 恒也，瓜生 誠司（現：理研），  
辛 埴，石渡 洋一，木下 豊彦，常行 真司，田中 虔一（現：埼玉工大），  
向井 孝三

【東大生研】 平川 一彦

【東北大通研】 大野 英男，松倉 文礼

【東北大金研】 高梨 弘毅

【東工大工学系研究科】 宗片 比呂夫，腰原 伸也

【阪大基礎工学研究科】 冷水 佐寿，大野 恭秀

【阪大工学系研究科】 笠井 秀明

【北大工学系研究科】 明楽 浩史

本研究プロジェクトの遂行は、研究室助手・技官・ポスドク・大学院生などチームの若いメンバーの頑張りがなければ不可能でした。特に、平成12年3月の研究所移転の前後には、チームメンバーに多大の負担をかけましたが、柏新キャンパスで新たに立ち上げた装置を使っての実験データが本プロジェクトの成果の主要な部分をなしているという事実は、チームメンバー全員の奮闘の証にほかなりません。

最後になりましたが、プロジェクトの期間中、常に笑顔で事務処理をこなして下さった秘書の窪田和子さん、高橋利栄さん、川村順子さんに改めて感謝いたします。

【柏キャンパスの物性研究所】





【上図】 家・勝本グループ  
 (後列左から) 後藤, 植木, 原,  
 寺田, 林, 小寺, 藤岡  
 (前列左から) 相川, 橋本, 遠藤,  
 家, 小林, 勝本



【左図】 小森グループ  
 (後列左から) 中辻, 大野, 小森  
 (前列左から) 飯盛, 山田, Cai

【下図】 八木隆多



【本プロジェクトに参加した事業団雇用のポスドク研究員諸氏】



勝本助教授と打ち合わせ中の Maxim Zalalutudinov



蔡 永強(Cai, Yong Qiang)



李 起東(Lee, Ki-Dong)



徐 明春(Xu, Ming-Chun)



内藤 賀公

【研究チームを笑顔で支えてくれた秘書さんたち】



川村順子さん 窪田和子さん

高橋利栄さん