

## VII. - 2 半導体物性グループ

教授 舛本 泰章  
助教授 野村晋太郎  
講師 奥野 剛史  
助手 鈴木 隆司  
助手 池沢 道男  
助手 阪東 一毅  
助手 山本 貴一  
助手 安坂 幸師

外国人研究員（ナノサイエンス特別プロジェクト） Vladimir K. Kalevich

外国人研究員（ベンチャービジネスラボラトリー） Sergey Verbin

ベンチャービジネスラボラトリー研究員 陳 曄 (Ye Chen)

大学院生 (12名)

### 【1】半導体におけるフェムト秒、ピコ秒時間分解分光（奥野剛史、池沢道男、舛本泰章）

＜光ヘテロダイン検出による半導体量子構造からの高感度 FWM 信号検出: 歪み誘起 GaAs 量子ドットのフォトンエコー＞（池沢道男、舛本泰章）

量子情報処理を実現するための一つの候補として、半導体量子点に閉じ込められた励起子が提案されていることもあって、半導体量子点における励起子コヒーレンスに興味を持たれ現在広く研究されている。励起子コヒーレンス研究に有用である時間分解四光波混合実験を、数密度が低く信号の微弱な自己形成量子点試料についても可能にするために、昨年度より高感度ヘテロダイン検出システムを構築して、単層の量子ドットからの信号検出を目指して実験を行ってきた。最近、実際に単層の量子ドットからでも高い S/N 比で信号が得られる事が分かり、これまでに報告されていないような興味深い現象が観測されるようになってきた。

一つの例としては、歪み誘起 GaAs 量子点がある。これは、GaAs 量子井戸にナノメートルサイズの局所的歪みを加える事で 0 次元的な閉じこめ領域を作った特殊な量子点である。ナノサイズの歪みは量子井戸の上に成長した InP 量子ドットを利用して実現される。この stressor が量子井戸面内に作る閉じこめポテンシャルは parabola でよく近似され、理論計算にも扱いやすい系となっている。また、同じ試料の中に量子井戸領域と量子ドット領域が混在しているという点も、次元性の違いを明らかにする上で重要である。このタイプの量子点では歪みの伝播する深さに限りがあるので、強い信号を得ようとして試料を多層化することも難しく、単一層でも信号を検出出来るだけの感度が不可欠で、これまで四光波混合の報告はなかった。使用した歪み誘起 GaAs 量子点は、4.8nm の厚さの単一 GaAs 井戸中に作られた  $3 \times 10^9$  個/cm<sup>2</sup> 程度の数密度の試料である。図 1 に示すように、歪み誘起 GaAs ドットからの微弱四光波混合信号(SID)が 2 桁に渡って高い S/N 比で得られている。この四光波混合信号は、第 2 パルスの後、遅れて発生している事が分かっているので、フォトンエコー信号である。そこで不均一な広がり仮定して解析を行うと、2K の温度で 24ps という位相緩和時間が得られた。(図 1) これは確かに同じグラフに示した量子井戸(QW)からの四光波混合信号の減衰時間と比べれば長いが、他の種類の自己組織化量子ドットについて報告されている値に比べて一桁近く短い。位相緩和の温度依存性にも特異な点が見られ、歪み誘起ドットならではの位相緩和メカニズムの存在が示唆されている。位相緩和時間の他に興味深い点としては、図 2 の右下図に拡大図を示すように、時間の早い部分にビート構造がみられ

る事である。偏光依存性を調べた結果、このビートは励起子分子に起因しており、ビート周期の逆数から励起子分子の束縛エネルギーが求められる事が分かった。この試料では、ビート周期の比から、量子点中では量子井戸に比べて1.5倍の束縛エネルギーを持つ事が分かる。励起子分子の束縛エネルギーが次元性の低下で増大する事は、例えば量子井戸中の井戸厚揺らぎに閉じこめられた励起子分子が通常より大きな束縛エネルギーを持つ事などにも示されているが、歪み誘起 GaAs 量子点では閉じこめポテンシャルが制御出来るという点でおもしろく、理論計算との比較が待たれる。

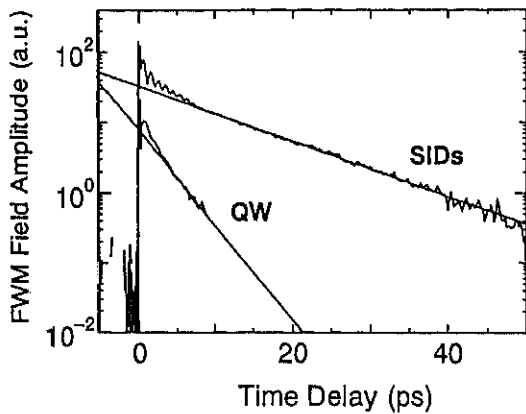


図1 単層の GaAs 量子井戸および単層の歪み誘起 GaAs 量子ドットからの微弱四光波混合信号。

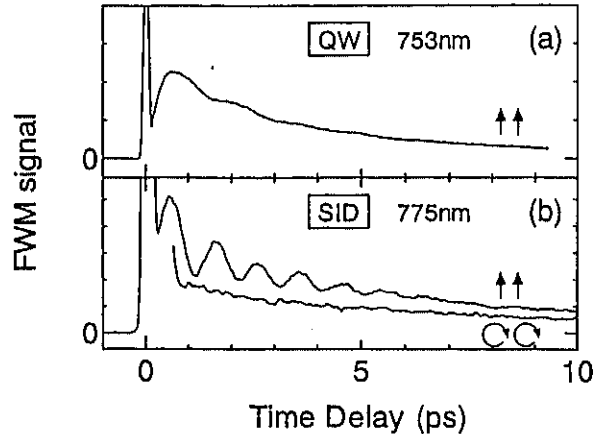


図2 微弱四光波混合信号の初期成分。

<電場下の InP 量子ドットにおけるフォトンエコー> (舛本泰章、須藤史敬、池沢道男、内山智香子<sup>A</sup>、相原正樹<sup>B</sup> <sup>A</sup>山梨大学医学工学総合研究部、<sup>B</sup>奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科)

InP 量子ドットに電気バイアスを加えドーパされた電子数を制御することができる。また、中性化した InP 量子ドットにさらに電場を加えると、InP 量子ドット中の光励起された電子・正孔対のうち、正孔が障壁層をトンネル過程で透過し、発光強度が減少する現象が観測されている。電場下で InP 量子ドットのヘテロダイン検出フォトンエコーの測定を行い、電子が2個ドーパされた状態から中性の状態になる際、信号が4桁増加することを見出した。この振舞は電子が2個ドーパされたときにはパウリブロッキングにより、量子ドット中に光励起双極子ができずフォトンエコーが出ないが、量子ドットが中性になると光励起双極子ができてフォトンエコーが発生すると理解できる。電場をかけて量子ドットから正孔が障壁層をトンネル過程で透過すると、図3に示すようにフォトンエコーは双極子の減衰を反映して急激に減衰する様子が見出された。フォトンエコーの時間波形はトンネル過程の non-Markov 的振舞を反映して非指数関数的減衰をしめす。

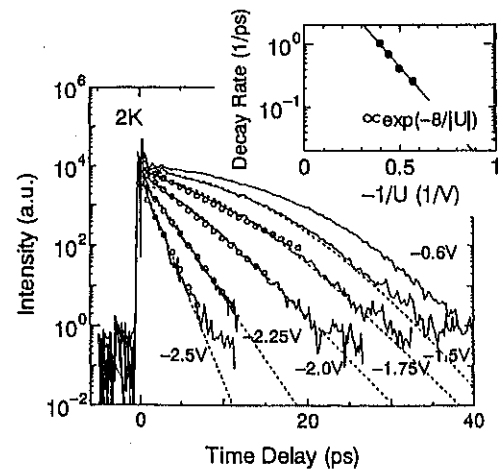


図3 電場下の InP 量子ドットのフォトンエコー信号。負の電圧印可に伴い正孔のトンネル過程により減衰が速くなる。

<In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As 歪量子井戸構造における光吸収飽和特性> (奥野剛史、舛本泰章、樋口彰<sup>A</sup>、吉野英生<sup>A</sup>、坂東弘之<sup>A</sup>、岡本紘<sup>A</sup> <sup>A</sup>千葉大学工学部)

In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As 歪量子井戸構造において、光吸収飽和特性での飽和励起密度  $I_s$  の低下について過去に論じられている。この量子井戸構造は、1.5 $\mu$ m 領域に光学遷移をもつこともあり、低い光電力で動作する光非線形デバイス実現に向けて興味もたれている。しかしながら、歪みの効果についての明確な実験報告はない。そこで今回、InP(001)基板上に、圧縮歪、無歪、引っ張り歪をもつ In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As 量子井戸構造を作製し、光吸収飽和に対する歪みの効果を検討した。

分子線エピタキシー法により、成長温度 380 $^{\circ}$ Cにて In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As 歪量子井戸構造 (井戸・障壁層の厚さ 7~10nm, 100 周期、ノンドープ) を  $x=0.30\sim 0.70$  と変えて成長した。Ti:sapphire レーザーと光パラメトリック増幅器によって得られる波長 1370~1600nm の光を励起光源とし、波長を各試料のバンド端に固定した。図 4 に In 含有量の変化に伴う  $I_s$  の変化を示す。無歪 ( $x=0.53$ ) の試料における  $I_s$  は、30 $\mu$ J/cm<sup>2</sup> である。In 含有量を増やし圧縮歪を導入すると  $I_s$  は

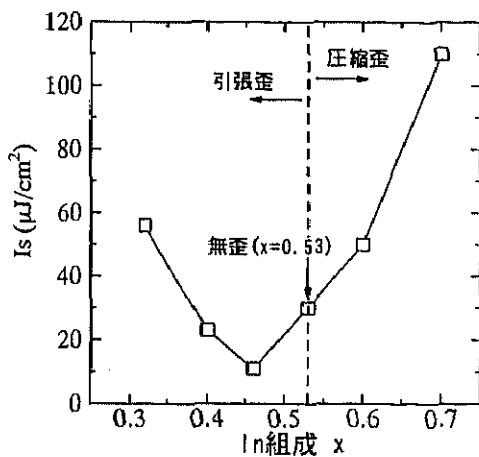


図 4 In 含有量変化に伴う  $I_s$  の変化。

増加する。In 含有量を減らし引っ張り歪を導入すると、 $x=0.46$  の試料において、 $I_s$  の値は無歪の 1/3 に減少するが、さらに In 含有量を減らしていくと、圧縮歪と同様  $I_s$  は増加する。 $x=0.46$  の引っ張り歪量子井戸構造の  $I_s$  が最も小さくなるのは、軽い正孔バンドが重い正孔バンドよりも高いエネルギーになる、という引っ張り歪の特性に起因している可能性がある。この試料において、ポンププローブ法により光非線形信号の応答時間を測定すると、12ps であった。試料の成長温度、ドーピング等の最適化を行い、1.5 $\mu$ m 領域において、 $I_s$  が小さく 1ps を切るような光応答を示す試料の実現を試みている。

## 【2】量子ドットの光物性 (舛本泰章、奥野剛史、池沢道男)

<半導体量子点におけるスピン緩和に関する研究> (菅野敦史、舛本泰章)

半導体中の電子および核スピンの制御が量子情報処理・量子コンピューティングへ応用する際重要な役目を果たすことが期待されている。特に半導体量子点は長いコヒーレンス時間を潜在的に持ちうる為、実現可能な固体素子の一つとして現在盛んに研究が行われている。そこで、本研究では半導体量子点をターゲットにしたスピン緩和に関する研究を行うべく、時間分解カー回転 (TRKR) およびファラデー回転 (TRFR) を利用した測定系を構築し測定を行った (図 5)。

TRKR 測定系を以下のように構築し、AlGaAs/GaAs 超格子および歪誘起 GaAs 量子ドットについてフェムト秒レーザーを用いることにより測定した結果、量子井戸層からのカー回転を観測することができた。またガラス中の CuCl 量子点を TRFR により測定したところ GaAs 系量子点でのカー回転では見られない特異な振る舞いを示した。単層 III-V 族量子点からのカー回転の観測とともに今後の課題である。

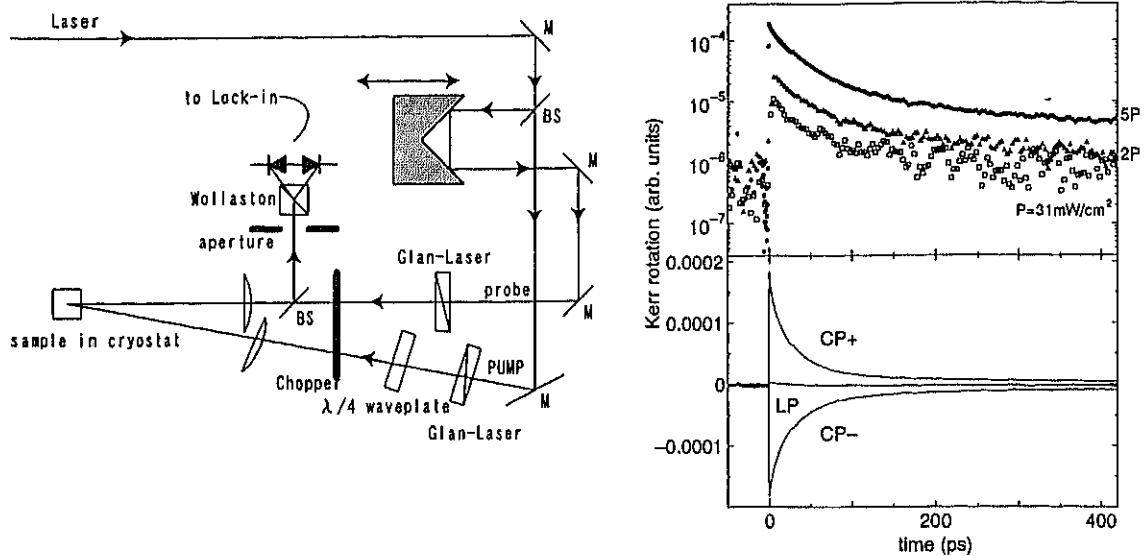


図5 TRKR光学系(左図)と2Kでの歪誘起GaAs量子ドット中の量子井戸層からのカー回転信号。右回り円偏光励起(CP+)と左回り円偏光励起(CP-)ではカー回転信号が逆転し、直線偏光励起ではカー回転していないことがわかる。

<歪誘起GaAs量子ドットの円偏光レーザー分光> (丸山理、舛本泰章)

近年、歪誘起量子ドット(SIQD)が新しい量子ドットの系として注目されている。SIQDは試料表面近くにある量子井戸に対して、量子井戸とは格子定数の異なる物質で構成させる島状自己形成量子ドット(ストレッサー)を試料表面に結晶成長させたものである。格子定数の違いによりストレッサー直下の量子井戸では量子井戸の電子・正孔のエネルギー準位に歪ポテンシャルが形成される。電子・正孔は井戸の厚さ方向の運動に加えて、井戸の面内方向の運動も制限され、ここに電子・正孔が3次元の閉じ込め受け、量子ドットのエネルギー準位を形成していると考えられている。このようにしてできたSIQDの大きな特徴としては調和振動子型の閉じ込めポテンシャルを持つことである。

一方、これまでのSIQDに関する報告は重い正孔に関してのみで、軽い正孔に関してはいまだ

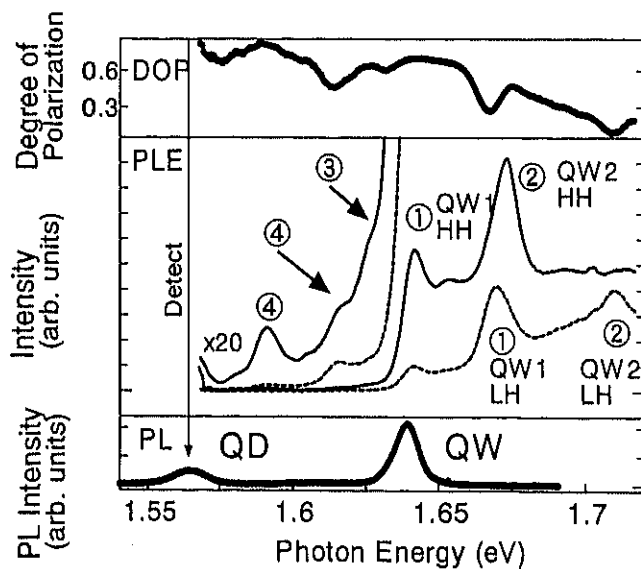


図6: 10KにおけるPL(下)、PLE(中)、偏光度(上)

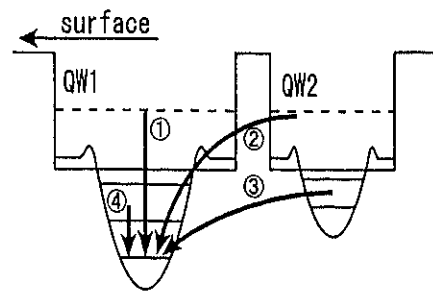


図7: 量子ドットの基底状態へのキャリアのエネルギー緩和: ①QW1から、②QW2から、③QW2に作られた量子ドットから、④QW1の量子ドットの励起準位から

に報告例がない。重い正孔・軽い正孔の励起には円偏光による異なる選択則が適用されることから、円偏光励起を用いてこれらを同定することが可能である。そこで本研究では厚さの異なる単一および二重量子井戸に形成された歪誘起 GaAs 量子ドットを試料として用いて、発光の励起スペクトル (PLE) の円偏光成分を測定し、量子井戸、量子ドットのエネルギー準位における重い正孔成分と軽い正孔成分の寄与とエネルギー緩和のメカニズムを調べた。

例として互いに十分接近した GaAs 二重量子井戸 (表面側 QW1 : 4.5nm, 基板側 QW2 : 4.0nm, ストレッサー : InP) 発光およびその励起スペクトルを図 6 に示した。励起スペクトルは量子ドットの電子と重い正孔の基底状態で検出した。実線は重い正孔、破線は軽い正孔成分を示す。バンドギャップエネルギーが一番小さいものは QW1 に作られた量子ドットの基底状態であることがわかった。この準位からの発光の起源として図 7 に示した 4 通りであると考えられる。

他方、偏光度 (DOP) には PLE に見られたピークに対応する構造が見られ、SIQD の発光における重い正孔、軽い正孔の寄与の仕方の違いが観測できた。特に SIQD の励起状態では最大 0.8 というきわめて大きな偏光度を示した。

#### <歪誘起 GaAs 量子ドットにおけるスピン量子ビート> (西林一彦、奥野剛史、舛本泰章) [4,5,7]

半導体量子ドットのもつスピンは長いコヒーレンス時間が予想され量子情報処理や量子計算に応用される可能性が指摘されているが、知見がほとんどない手つかずの状態である。量子井戸中の電子スピンの  $g$  因子は井戸層と障壁層を構成する半導体中の電子がもつ  $g$  因子の平均になるので、井戸厚に大きく依存し、また、 $g$  因子は heavy hole と light hole の分裂とその光学遷移の偏光依存性の違いにより、異方性をもつ。こうした研究の最も蓄積のある GaAs 量子井戸と歪誘起 GaAs 量子ドットについて電子スピンの  $g$  因子の井戸厚依存性と異方性についてスピン量子ビートを用いて研究した。スピン量子ビートは Voigt 配置の磁場下で円偏光励起した電子スピンの Larmor 歳差運動を円偏光発光の時間分解波形に観測することができる。量子井戸ではこの手法は最近よく使われてきたが、量子ドットでは稀で、歪誘起 GaAs 量子ドットでは初めて観測された。

試料は 1 層の GaAs-Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 量子井戸を試料表面に成長された自己形成 InP 量子ドットで歪ませた構造である。量子ドットは井戸厚が 3.9 nm または 4.8 nm、井戸層に沿った方向には自己形成 InP 量子ドットの大きさから 90 nm の大きさがある。磁場下におかれた歪誘起 GaAs 量子ドットをピコ秒チタン・サファイアレーザーで励起し、歪誘起 GaAs 量子ドットの発光をストリークカメラを用いて時間分解した。Voigt 配置で円偏光励起、円偏光で観測するとき量子ビートが観測された。振動周期  $T$  から  $h/T$  により Zeeman エネルギー分裂  $\Delta E_e$  がわかる。

井戸層に垂直に入射光を入れ、発光を観測する場合には  $\Delta E_{e0^\circ} = g_{e\perp} \mu_B B$ 、井戸層を入射光の方向、発光を観測する方向に 45° 傾けた場合には  $\Delta E_{e45^\circ} = \mu_B B \sqrt{g_{e\perp}^2 + g_{e\parallel}^2}$  で与えられ、

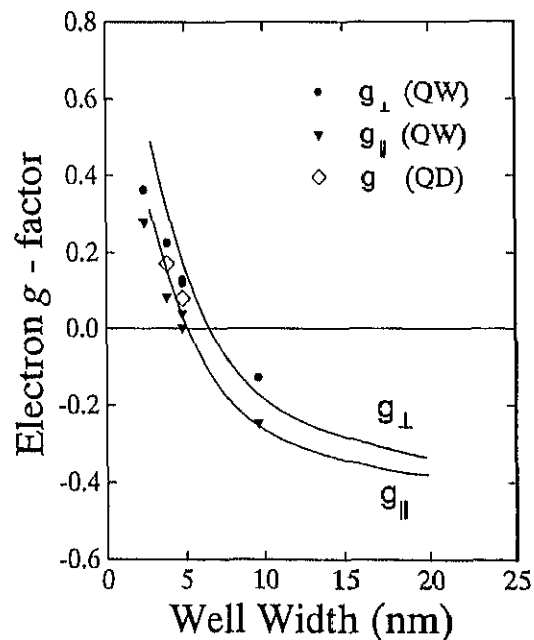


図 8 量子ドットおよび量子井戸中の電子の  $g$  因子の井戸厚依存性。

2方向の実験測定値から  $g_{e\perp}$  と  $g_{e\parallel}$  が求められる。

こうして求められた  $g_{e\perp}$  と  $g_{e\parallel}$  は、図8に示すように同じ試料の量子井戸では  $g_{e\perp}$  が  $g_{e\parallel}$  より大きく異方性をもち、歪誘起量子ドットでは  $g_{e\perp}$  が  $g_{e\parallel}$  と等しく量子井戸の  $g_{e\perp}$  と  $g_{e\parallel}$  の平均であった。また、井戸厚が薄くなると連続的に増加する様子が観測された。 $g$  因子の等方性は、歪みにより量子ドット内では heavy hole と light hole の分裂がほとんどなくなると考えて説明される。

<電子がドーピングされた InP 量子ドットの示す長時間スピン偏極> (I.V. Ignatiev<sup>A</sup>, S.Yu. Verbin<sup>A</sup>, 舛本泰章, 池沢道男, 奥野剛史 St. Petersburg State University<sup>A</sup>) [1,2,7]

自己形成 InP 量子ドットのスピンの状態は電子のドーピングや中性化により劇的に変えることができる(図9)。中性化されたときには、ファラデー配置で円偏光をもちいて観測される bright 励起子のゼーマン分裂による量子ビート、およびファラデー配置で励起と観測に同じ円偏光、直線偏光で観測される bright 励起子と磁場により部分的に許容となった dark 励起子の分裂による量子ビートが、異なる偏光選択則で観測される。さらに電子の1個ドーピングすると無磁場のとき直線偏光で観測されるイオン化励起子の分裂による量子ビートが観測される。電子のドーピングが進むと Voigt 配置で円偏光で励起し、円偏光で観測するとき図10に示すような電子のスピン量子ビートが観測された。振動の周期  $T$  から Zeeman エネルギー分裂  $\Delta E_z$  が  $h/T$  からわかり、電子の  $g$  因子は 1.5 で与えられ、bright 励起子と磁場により部分的に許容となった dark 励起子の分裂による量子ビートから求められた  $g$  因子の 1.43 とかなりの良い一致を示す。減衰時定数は 500ps 程度で長い。

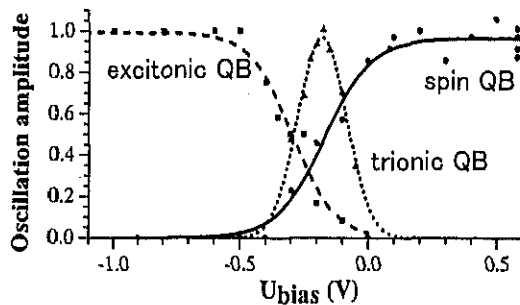


図9 InP 量子ドットにおける3種類の量子ビート信号の電気バイアス依存性

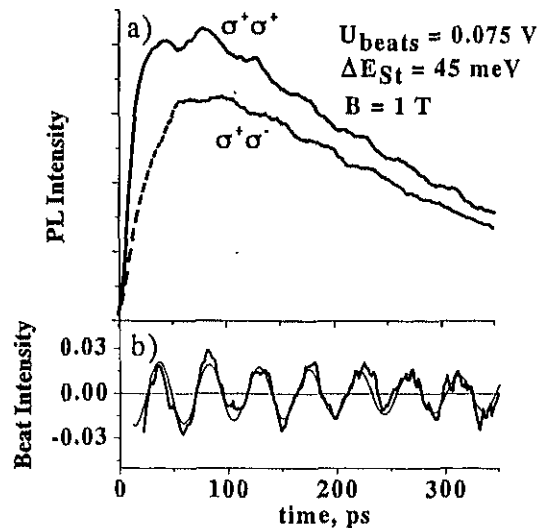


図10 InP 量子ドットにおける電子のスピン量子ビート

<電子ドーピング基板から離れた量子ドットにおけるプラズモン-LO フォノン結合モードの観測とエネルギー緩和への影響> (A.V. Baranov<sup>A</sup>, A.V. Fedorov<sup>A</sup>, 舛本泰章<sup>A</sup> Vavilov Optical Institute) [11]

LO フォノン放出は半導体中のホットエレクトロンの最も速いエネルギー緩和機構である。量子ドットでは電子エネルギーが離散化するため、この緩和機構が有効に機能せず量子ドットの発

光効率を下げる可能性がフォノンボトルネック効果として指摘されてきた。舛本らは InP 量子ドットを用いてこのフォノンボトルネック効果が事実上ほとんど無視できることを指摘してきたが、電子がドーピングされた n-GaAs 基板上に成長された自己形成 InAs 量子ドットにおいて基板中の電子プラズマと量子ドット中の LO フォノンが結合してプラズモン-LO フォノン結合モードをつくりエネルギー幅が広がるために、量子ドット中の電子のエネルギー緩和が高速化するという新しい機構を提唱した。実験では  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の電子ドーピングをされた GaAs 上に 100 nm の GaAs バッファ層をはさんで InAs 量子ドットを成長した試料において図 11 に示すようなプラズモン-LO フォノン結合モードを観測し、100 nm 離れた電子プラズマが量子ドット中の LO フォノンに長距離クーロン相互作用で結合した様子が観測された。この実験をふまえて、理論的にドーピング電子濃度やドーピング層と量子ドットの距離の関数として電子のエネルギー緩和速度を計算し、プラズモン-LO フォノン結合モードが量子ドット中の電子のエネルギー緩和に大きな影響を及ぼすことを示した。

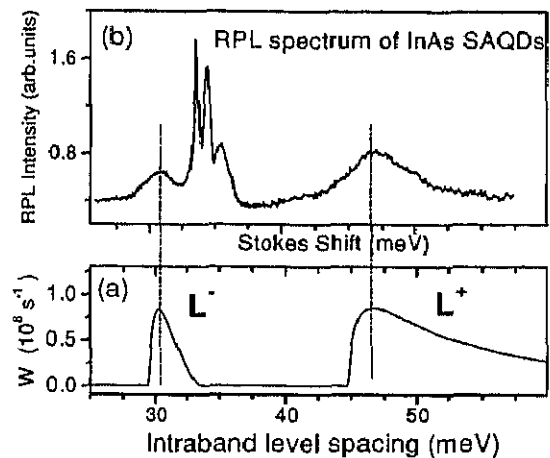


図 11 n-GaAs 基板上に形成された InAs 量子ドットの共鳴発光スペクトルと電子のエネルギー緩和速度の離散エネルギー間隔依存性。

#### <CdSe/ZnS 量子ドットのフォノン> (A.V. Baranov<sup>A</sup>, 舛本泰章<sup>A</sup> Vavilov Optical Institute) [9]

化学的に作成された障壁層 ZnS の厚みの異なる CdSe 量子ドットにおいて共鳴ラマン散乱により光学型フォノンスペクトルを研究した。ZnS 層の厚みが 0.5 単原子層から 3.4 単原子層になると、アモルファスから結晶に変化することと表面フォノンの強度が増加することが ZnS 層に共鳴したラマンスペクトルから見い出された。また、CdSe 量子ドットに共鳴したラマンスペクトルからは、ZnS 層の厚みの増加により CdS が歪み LO フォノンスペクトルが広がる様子が観測された。当該研究で示された共鳴ラマン散乱は量子ドットの品質を制御する良い手法である。

#### <電子ドーピング InAs 量子ドットの円偏光メモリー> (V.K. Kalevich<sup>A</sup>, 舛本泰章, 池沢道男, 奥野剛史<sup>A</sup> Ioffe Physico-Technical Institute) [15]

GaAs の様な一般の閃亜鉛鉱型の III-V 族半導体では、円偏光による光学遷移選択則および正孔のスピンの緩和が極めて速いことから最も低いエネルギーの光学遷移の発光の円偏光度  $\rho_c$  は常に正である。ところが、電子がドーピングされた InAs 量子ドットでは障壁層を励起したとき  $\rho_c$  が負になることを見出した。電子が 2 個ドーピングされた InAs 量子ドットの選択励起では  $\rho_c$  は正になるが、障壁層 GaAs を励起すると  $\rho_c$  は負になる。

2 個以上の電子を量子ドットが含むとき一番低いエネルギー量子準位を占める 2 つの電子が反平行のスピンの配置をするから、 $\rho_c$  は正孔のスピンのみを反映する。

障壁層のバンドギャップエネルギーより低いエネルギーで量子ドットを準共鳴励起した場合には、量子ドットの正孔の Hanle 効果が図 12 の様に観測される。横磁場下では、偏光度の磁場依存性は、 $P(B) = P(0) / [1 + (\Omega T_s)^2]$ 、ただし  $\Omega = g \cdot \mu_B / \hbar$ ,  $1/T_s = 1/\tau + 1/\tau_s$  と書かれ、

上図の磁場依存性から  $B \sim 0.5 \text{ T}$  で  $\Omega T_s = 1$  となるのが観測される。一方、障壁層を励起した場合には、下図に示すように Hanle 効果は極めて励起強度に依存した振舞を示し、弱励起では、数

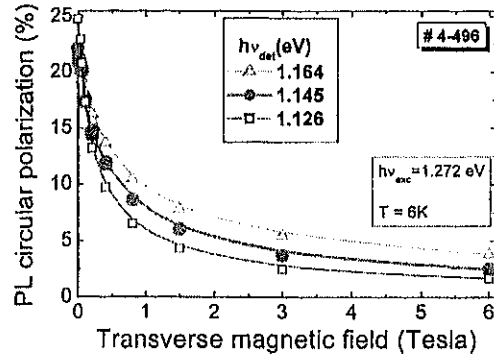
Gauss 程度の極めて小さな磁場で  $OT_s = 1$  となること、すなわち極めて長いスピン緩和時間（正孔スピンの緩和時間は、低温で 100 ns より長い）が観測される。こうした Hanle 効果の測定には、42 kHz の周波数で左右円偏光を交互に試料に照射しているが、右円偏光で定常的に試料に照射しつつ Hanle 効果を測定すると横磁場に関して極めて大きな非対称性が見えてくる。この非対称性は InAs 量子ドット中の核の偏極とそれがもたらす核磁場  $B_N$  の発生を意味している。

電子を 2 個以上含む InAs 量子ドットにおいて障壁層を励起したとき、負の偏光度が観測される理由は、量子ドット中の大きな非等方交換相互作用による量子ドット中の電子・正孔のスピンの反転により説明することができる。

<CdTe 量子ドットにおけるスピン緩和>  
(陳 暉、奥野剛史、舛本泰章)

量子ドット中の電子のスピンの長い緩和時間が実現することができれば、量子情報処理に用いられる可能性がある。量子ドット中の電子スピンの長い緩和時間が実現すると期待できるのは、バルク半導体中の電子スピンの主要な緩和機構である D'yakonov-Perel' (DP)機構が伝導電子のスピンの軌道相互作用にもとづくため、伝導電子のもつ運動量が必須であるにもかかわらず、量子ドット中に局在した電子には、並進対称性がなく DP 機構が凍結すると考えられるからである。量子ドット中の電子のスピンの働く緩和機構としては、非等方的な量子ドットで見られる電子・正孔間の非等方

Hanle effect on holes in QDs



Hanle effect on the ground state PL at excitation above the barrier

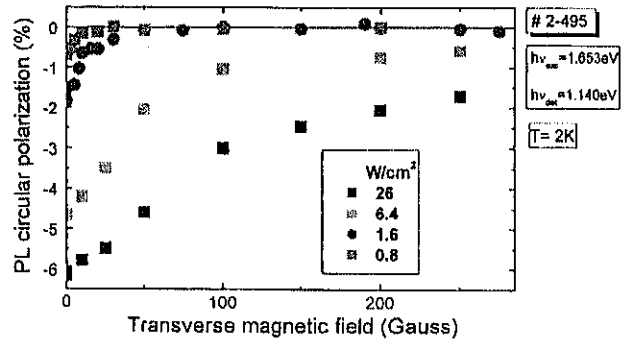


図 12 量子ドットを準共鳴励起した場合と障壁層を励起した場合の電子が 2 個ドーパされた InAs 量子ドットの Hanle 効果。

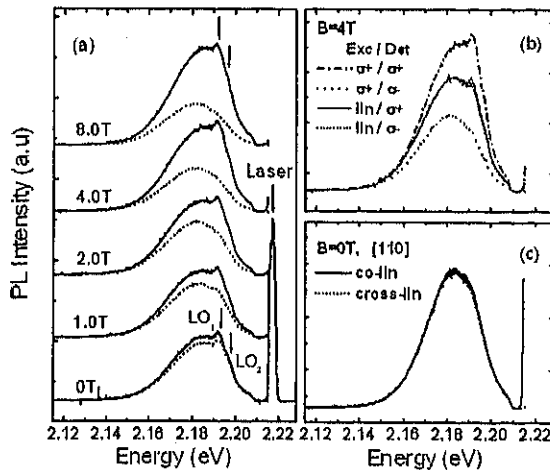


図 13 CdTe 量子ドットの偏光フォトルミネッセンススペクトル。(a) 実線は励起円偏光と同じ向き、点線は励起円偏光と逆向きの円偏光成分を表わす。(b) 4T の縦磁場下での円偏光励起と直線偏光励起の場合の円偏光フォトルミネッセンススペクトル。(c) [110]方向を向いた直線偏光励起下で、励起直線偏光と平行あるいは垂直方向に向いた直線偏光フォトルミネッセンススペクトル。



的交換相互作用、電子スピン・核スピン間の超微細相互作用がある。量子ドット中の電子のスピン緩和機構は未解明で、長いスピン緩和時間を求める観点からも研究しなければならない。本研究ではCdTe量子ドットの電子のスピン緩和を偏光フォトルミネッセンススペクトルおよび時間分解偏光フォトルミネッセンスを通じて調べた。

縦磁場下で、CdTe量子ドットの準共鳴励起下で偏光フォトルミネッセンスの偏光度と時間依存性を調べ、円偏光度が磁場の強度と共に増加する振る舞いを観測した。フォトルミネッセンスの円偏光、直線偏光依存性は、励起子の非等方的電子・正孔交換相互作用によっては説明できず、磁場の強度とともにスピン緩和速度が遅くなると仮定すると説明できる。偏光フォトルミネッセンスの時間特性はスピン緩和速度が磁場に依存し、磁場の強度と共にスピン緩和速度が遅くなる事を明確に示している。

電子スピンの緩和機構として、電子スピンと核スピン間の超微細相互作用により核スピンがもたらす核磁場のゆらぎを考えると、磁場の増加と共に核磁場のゆらぎの寄与は小さくなるので、電子スピンの緩和時間は長くなる。局在電子のスピン緩和に用いられたこの考えを用いると、スピン緩和速度は磁場  $B$  の時の電子スピンの歳差運動の角周波数  $\Omega = g_e \mu_B B / \hbar$  とゆらぐ核スピンの相関時間を  $\tau_c$  として、

$$\frac{1}{\tau_s} = \frac{1}{\tau_s(0) \sqrt{1 + \Omega^2 \tau_c^2}}$$

で表われ、定常フォトルミネッセンススペクトルの円偏光度から求めたスピン緩和速度も偏光フォトルミネッセンス成分の時間依存性から求めたスピン緩和速度も同じ式で説明されることが図14によりわかる。

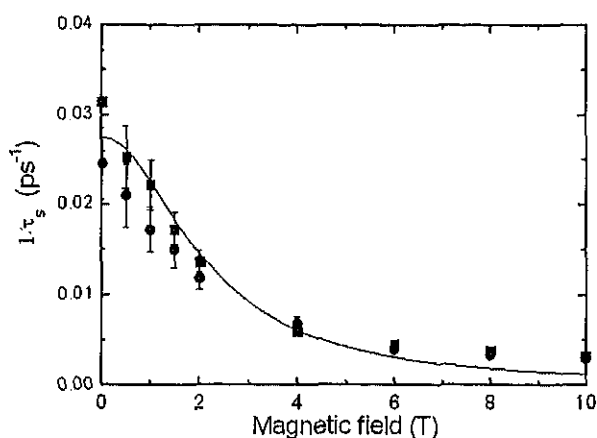


図14 スピン緩和時間の磁場依存性。■は円偏光フォトルミネッセンスの時間依存性から求めたデータ、●は円偏光フォトルミネッセンスの偏光度から求めたデータ。実線は本文中の式によるフィッティング。

以上の考察から、CdTe量子ドット中の電子スピンの緩和機構は電子スピンとゆらぎを持つ核スピン間の超微細相互作用であると結論した。

### 【3】新しいナノ構造の探求（阪東一毅、安坂幸師、舛本泰章）

<ZnO 単一ナノベルトの室温励起子レーザー発振の空間分解分光>（阪東一毅、沢辺大樹、舛本泰章）[8]

近年、化合物半導体を用いたナノサイズウィスカー系結晶の作製・光学的研究が盛んに行われており、特にワイドギャップ半導体である ZnO では、ナノワイヤーの室温レーザー発振の成功にまで至っている。これまで、新規な構造である帯状のナノベルト結晶を取り上げ、室温での励起子レーザー発振の観測を行ってきた。そこで、形状を反映したレーザー発振特性を調べるため発光の空間分解測定を行った。ZnO ナノベルトは Ar 雰囲気中で ZnO 粉末を高温加熱(1450℃)し、

昇華再結晶プロセスによって作製された。このナノベルトを単一に分解し SEM 観察によって結晶端面の比較的良好なナノベルトを選び出した。発光は弱励起条件において CW He-Cd レーザー、強励起条件において Nd:YAG レーザーの4倍波(266nm)を励起光源として用い、室温で測定を行った。弱励起条件下ではブロードな励起子発光及びそのフォノンレプリカ発光が見えた。また強励起条件下では励起子発光エネルギーの低エネルギー側に励起子-励起子散乱過程によるブロードな自然放射光が観測され、さらに励起強度を上げ

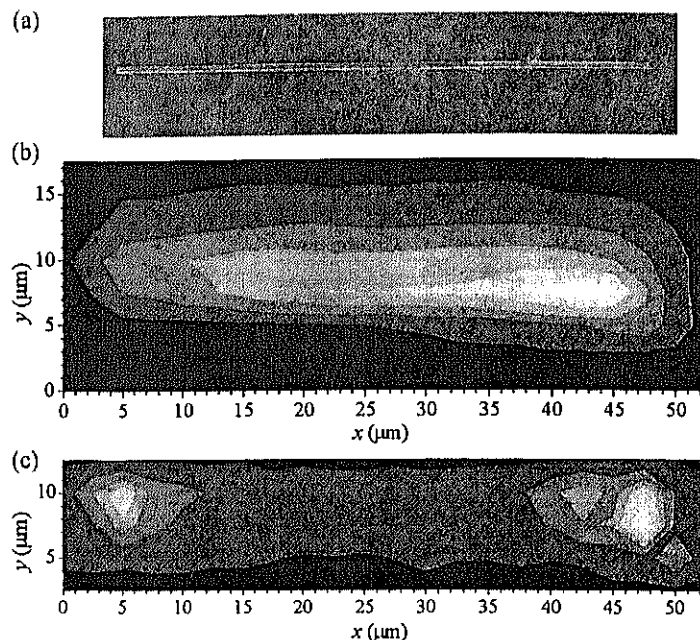


図 15 ZnO 単一ナノベルトの SEM 像と発光像  
(a)SEM 像、(b)弱励起下での自然放射光による発光空間像、  
(c)強励起下でのレーザー発振光空間像。

るとその低エネルギー側にレーザー発振による数本の鋭い発光ピークが現れた。図 15(a)は発光を測定した単一ナノベルトの SEM 像であり、このナノベルトからの発光を長作動距離顕微鏡により拡大し、空間分解分光を行った結果を図 15(b)及び(c)に示している。弱励起下(b)では、励起子の自然放射光がナノベルトのあらゆる場所から光っている様子が見える。しかし強励起下(c)では結晶の両端面においてのみレーザー発振光が放射されている様子が確認できた。これはナノベルト結晶の中でベルトの伸びた方向に縦モードが形成され両端面からレーザー発振光が放射されていることを示している。

<(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー結晶の低温における光物性> (中村俊輝, 阪東一毅, 舛本泰章, 小林俊介<sup>A</sup>, 佐々木史雄<sup>A</sup>, 堀田収<sup>B</sup>, 産総研光技術<sup>A</sup>, 京工繊大繊維<sup>B</sup>)

$\pi$  電子共役系化合物は有機電界発光(EL)素子などの発光デバイスへの応用や、その電気的特性より有機薄膜 FET への応用が期待されている。特に最近、新規に合成された(チオフェン/フェニレン)コオリゴマー(BP1T)結晶は室温において強パルス光励起することにより自然放射増幅光(ASE)を発生することが報告されており、高い機能性を持った新規な有機材料として注目を集めている。しかし、その物性研究はまだほとんど着手されていない。このため、この BP1T 結晶の基礎物性を明らかにする目的で低温における発光スペクトル及び強励起条件下での光学特性について調べた。図 16 は室温と低温における BP1T 結晶の弱励起における発光スペクトルを示している。室温での発光ピークはブロードなものであり、分子の振動モードによると思われる発光の振動構造が確認できた。一方、低温での発光スペクトルでは室温で観測されたブロードな発光帯の中に細かなピークを観測することができた。これらのピークはいくつかの分子振動の足し合わせで表現できる。さらに室温では観測されなかった最も高エネルギー側にあるフランク-コンドンモデルの 0-0 遷移による発光ピークが観測できた。図 17 は低温での BP1T 結晶の発光スペクトルの励起強度依存性を示している。励起強度を上げていくと、特定の振動モードの発光ピー

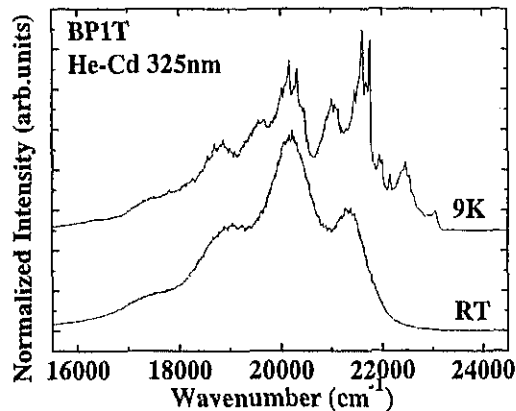


図 16 BP1T 結晶の室温と低温における弱励起発光スペクトル

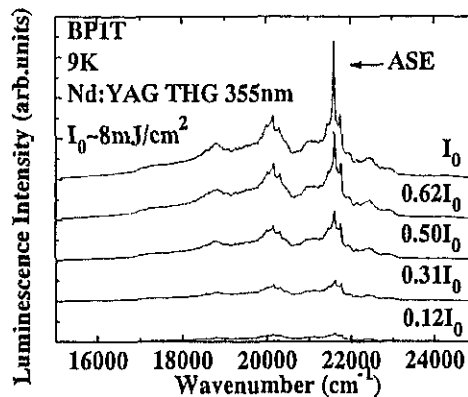


図 17 BP1T 結晶の低温における強励起発光スペクトル

クにおいて顕著に ASE が発生した。室温時ではブロードな発光帯の狭線化を生じたが、低温での測定によって ASE は特定の振動モードにおいて生じることがわかった。またさらに励起強度を上げることににより、様々な振動モードのピーク位置で ASE による発光ピークの非線形増加が得られた。

#### <単層カーボンナノチューブの作製と力学特性解析> (安坂幸師)

単層カーボンナノチューブ(SWCNT)は、優れた力学的特性を持つことが理論・シミュレーションなどから示唆され、新規ナノ構造材料への応用が期待されている。しかしながら、実際にこうした微小材料の両端をつかみ、変形させて力学特性値を求めた実験は、これまで行われていない。本研究では、SWCNT の力学的特性を明らかにするために、透過電子顕微鏡内で一本の孤立した SWCNT を作製して、その場で引張り変形し、その過程をその場原子直視観察すると同時に材料力学実験を行った。

図 18 は、孤立した SWCNT の引張り変形過程を連続観察した高分解能像である。カンチレバーと基板は、一本の SWCNT だけで接合している。右側 A と左側 B の領域は、それぞれカンチレバーと基板表面のグラファイト層である。引張り変形前、SWCNT の最小外径は、0.9nm であった。ピエゾ駆動により、SWCNT を矢印の方向に引張ると、座屈により、SWCNT の一部にくびれが形成された(図 18(b))。さらに矢印の方向に引張ると、くびれが細くなり破断した(図 18(c))。こうした SWCNT のくびれ形成については、Stone-Wales 転移反応に起因して生じることが提案されている。破断した SWCNT の先端形状は、閉殻構造になった。この SWCNT の応力-ひずみ曲線を解析した結果、ヤング率は 380GPa、引張り強さは 10GPa、SWCNT 破断時の最大ひずみは 0.3 であることが明らかになった。

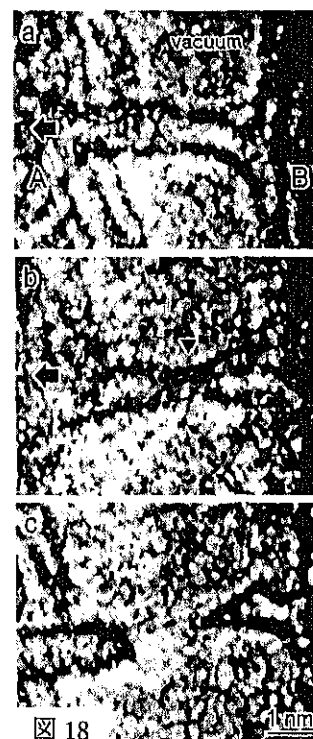


図 18

#### 【4】半導体ナノメートル構造の光物性 (野村晋太郎)

##### <単一量子井戸中の量子ドット状態の空間分解発光測定> (野村晋太郎) [17-19]

本研究では近接場光学顕微鏡を用いて量子ドットに局在した電子-正孔状態の空間分解測定を試みた。Be-デルタドープ層を有する Si ドープ n 型ヘテロ構造を用いた正方格子量子ドット超格

子構造の空間分解発光測定を行った。負バイアス電圧印加に伴い、量子ドット状態からの発光の空間分布がより局在化する様子が観察された。  
 本研究は神奈川科学技術アカデミー齋木敏治研究室長慶応義塾大学助教授、松田一成研究員、東京工業大学青柳克信教授との共同研究である。

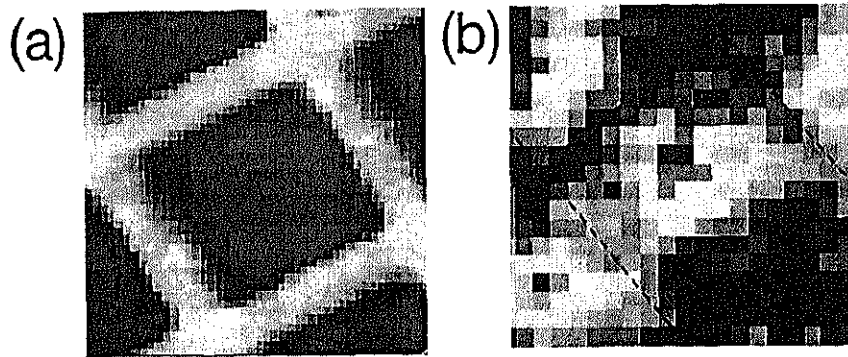


図 19 (a)、AFM 像。(b)発光空間プロファイル。

<自己組織化ナノポーラス構造を用いた量子ドットアレー形成> (今井剛、伊藤宙陞、野村晋太郎) [16]

従来から電子ビーム露光法により周期が 150 nm - 500 nm の量子ドットアレー構造を作成してきているが、大面積の試料を作成するには非常に長時間がかかること、リソグラフィーとしての極微細化の限界があることから自己組織化の手法を取り入れることを試みた。自己組織化ナノポーラス構造を用いて Au 網状構造を作成し、Be- $\delta$  ドープ GaAs 単一ヘテロ接合基板上に転写を行い、量子ドットアレーの作成を試みた。作成した試料の発光スペクトルと局所密度汎関数法に基づく計算との比較を行い、量子ドットを形成するポテンシャルが形成されることを示した。

<ゲート付きアンドープ量子井戸構造の発光測定> (佐藤大輔、野村晋太郎) [21]

ゲート付きアンドープヘテロ構造の発光のバックゲート電圧依存性の測定を行った。バイアス電圧に依存して、荷電励起子から 2 次元電子系に移る発光スペクトル構造を連続的に観測した。この構造に対する光学測定は他には例がない初めてのものである。電子密度を  $1 \times 10^9$  から  $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  まで連続的に可変であり、アンドープのためイオン化ドナーポテンシャルの揺動を受けないという大きな特徴を持ち、低電子密度領域における電子間相互作用の観測に適した試料である。

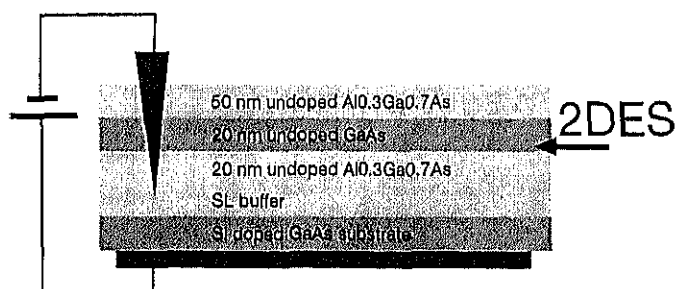


図 20 ゲート付きアンドープ量子井戸構造。裏面電極と表面オーミック電極の間にバイアス電圧を印加して

本研究は NTT 物性科学基礎研究所高柳英明所長、平山祥郎部長のグループとの共同研究である。

<ラマン分光測定系の立ち上げ> (田中満雄、山本貴一、野村晋太郎)

半導体界面の2次元電子系などに対する微細加工により作成された量子ドットに関する研究が盛んに行われている。我々は量子ドット列試料の評価、および物理的性質を調べる手段の一つとしてラマン分光法を選び、量子ドット列試料の測定に耐えうる高感度な測定系の立ち上げを行っている。

【5】半導体スピントロニクス

＜2次元電子系端状態のスピンの偏極度の検出＞（野村晋太郎）[20]

電子ビーム露光法により作成したナノスケールの正方格子を用いて、横方向の周期的ポテンシャルをn型のGaAs/AlGaAsヘテロ構造に印加することにより、面内電子密度分布を2次元電子の状態から0次元の状態へと連続的に変化させることが可能であることを示してきた。量子ドットアレーの端状態について局所スピン密度汎関数法に基づく計算を行った。この計算により、磁場中発光ピークに現れる複数のピークから量子ドット端状態の内側の圧縮性領域と外側の圧縮性ストリップの電子スピン偏極度を独立に測定可能であることを示した。また、実験と良く一致することがわかった。この方法は従来の単一電子トンネリング等を用いた測定法と比較して、電子スピン偏極度を測定可能である点が大きな長所であり、さらに近接場分光法の適用により、圧縮性・非圧縮性液体状態のマッピングが可能であると見込まれる。

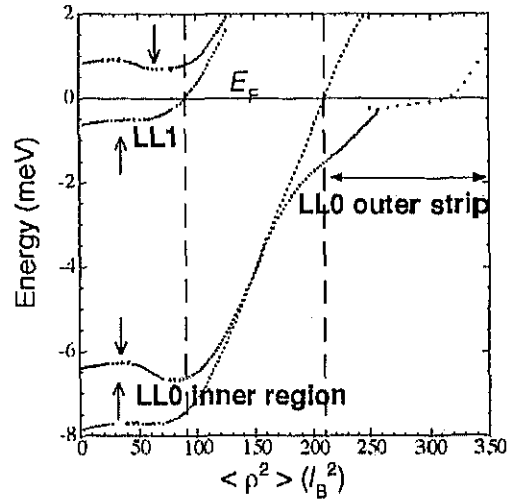


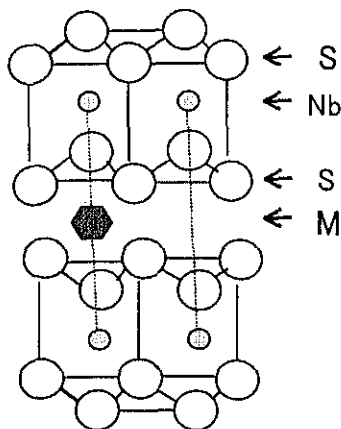
図 21 端状態における一電子エネルギー準位

＜スピントロニクスへ向けた中赤外分光系の立ち上げ＞（津村公平、野村晋太郎）

ヘリウム温度において最大5 Tの磁場下での中赤外領域発光測定が可能とする測定系を立ち上げた。一例として、g値が大きいとされるInAs/InGaAs量子井戸の磁場下発光測定を行い反磁性シフトを観測した。

本研究はNTT物性科学基礎研究所新田淳作グループリーダーとの共同研究である。

【6】 $M_{1/4}NbS_2$  (M=Eu,Fe) における $^{151}Eu$ のメスバウアー効果と、 $Fe_{1/4}NbS_2$ の $^{93}Nb$ の核磁気共鳴の核スピン緩和 $T_2$ の測定（鈴木 隆司）



$M_{1/4}NbS_2$  (M=Eu,Fe) は層状物質である $NbS_2$ の層間に金属Mをインターカレートした金属伝導をもつ磁性体である。これらの物質のメスバウアー効果と核磁気共鳴の実験を行った。その結晶構造を図22に示す。

図 22 層間にインターカレートした金属M

### <<sup>151</sup>Eu のメスバウアー効果> (鈴木隆司)

<sup>151</sup>Sm は 21.6KeV のメスバウアー  $\gamma$  線を出し基底状態の <sup>151</sup>Eu に遷移する。したがって、<sup>151</sup>Eu のメスバウアー効果の実験が可能である。しかし、励起状態の寿命が <sup>57</sup>Fe 以上に比べて非常に短いため吸収幅は広がり、スペクトルの分解能は悪くなる。Eu の原子価は 2 価と 3 価の状態が存在する。NbS<sub>2</sub> に Eu をインターカレートした Eu<sub>1/4</sub>NbS<sub>2</sub> について、層間に入った Eu の電子状態を調べる目的でメスバウアー効果の実験を試みた。室温で得られた結果は、本来の吸収幅よりかなり広がったスペクトルであった。まず考えられるのは磁気秩序による内部磁場によるものである可能性である。しかし、それを確かめるには温度変化の実験をする必要がある。又、スペクトルの形状から原子価の異なる (2+,3+) の混在の可能性もあり、X線回折の実験を行うことを含めて検討中である。

### <<sup>93</sup>Nb の核磁気共鳴による T<sub>2</sub> の測定> (鈴木隆司)

Fe<sub>1/4</sub>NbS<sub>2</sub> については、これまでメスバウアー効果の実験、および中性子回折の実験でその磁性を調べてきた。その結果、磁気構造や交換相互作用の性質が明らかになってきた。その結果をふまえて、Nb 核の核磁気共鳴の共同実験をおこなった。Fe<sub>1/4</sub>NbS<sub>2</sub> は T<sub>N</sub>=138K の反強磁性体である。T > T<sub>N</sub> では Nb 核スピンの緩和時間 T<sub>2</sub> は 2 種類測定され、このことは Nb 原子のしめるサイトが 2 つあることと一致している。更に各々の測定強度は 2 ~ 3 倍の違いが有ることが分った。これらの実験結果は、T<sub>2</sub> の値が Fe 原子が持つ局在した磁気モーメントの双極子場によるとする事によって説明できることが分った。T<sub>2</sub> の温度変化は T<sub>N</sub> を境にして T < T<sub>N</sub> で急激 (約 10 倍) に長くなる。この変化は、Fe 磁気モーメントのが秩序化することによって Nb 核スピンの緩和がしにくくなることで容易に予測できる。これまでの理論的研究による T<sub>2</sub> の振る舞いの説明を試みている。

### <論文>

1. I.V. Ignatiev, I.Ya. Gerlovin, M. Ikezawa, V.K. Kalevich, S.Yu. Verbin and Y. Masumoto: "Long-lived spin polarisation in the charged InP quantum dots", *Physica E* **17**, 361 (2003).
2. I.V. Ignatiev, T. Okuno, S.Yu. Verbin, I.A. Yugova and Y. Masumoto: "Spin quantum beats in charged and neutral InP quantum dots", *Physica E* **17**, 365 (2003).
3. J. Qi, J.M. White, A.M. Belcher and Y. Masumoto: "Optical spectroscopy of silicon nanowires", *Chem. Phys. Lett.* **372**, 763 (2003).
4. K. Nishibayashi, T. Okuno, Y. Masumoto and H.-W. Ren: "Luminescence quantum beats of strain-induced GaAs quantum dots", *Phys. Rev. B* **68**, 35333 (2003).
5. Y. Masumoto, K. Nishibayashi and T. Okuno: "Quantum beat of strain-induced GaAs quantum dots", *Physica E* **21**, 1012 (2004); 11th Int. Conf. on Modulated Semiconductor Structures (Nara, 2003).
6. J. Zhao, A. Kanno, M. Ikezawa and Y. Masumoto: "Longitudinal optical phonons in the excited state of CuBr quantum dots", *Phys. Rev. B* **68**, 113305 (2003).
7. Y. Masumoto, I.V. Ignatiev, K. Nishibayashi, T. Okuno, S.Yu. Verbin and I.A. Yugova: "Quantum beats in semiconductor quantum dots", *J. Lumin.* **108**, 177 (2004); 14th Int. Conf. on Dynamical Processes in Excited States of Solids (Christchurch, 2003).
8. K. Bando, T. Sawabe and Y. Masumoto: "Room-temperature excitonic lasing from ZnO single nanobelts", *J. Lumin.* **108**, 385 (2004); 14th Int. Conf. on Dynamical Processes in Excited States of Solids (Christchurch, 2003).

9. A.V. Baranov, Yu.P. Rakovich, J.F. Donegan, T.S. Perova, R.A. Moore, D.V. Talapin, A.L. Rogach, Y. Masumoto and I. Nabiev: "Effect of ZnS shell thickness on the phonon spectra in CdSe quantum dots", *Phys. Rev.-B* **68**, 165306 (2003).
10. 池沢道男、奥野剛史、舛本泰章、A.A. Lipovskii : "PbSe 量子ドットの光物性" ナノ学会会報 **1**, 27 (2003).
11. A.V. Baranov, A.V. Fedorov, I.D. Rukhlenko and Y. Masumoto: "Intraband carrier relaxation in quantum dots embedded in doped heterostructures", *Phys. Rev. B* **68**, 205318 (2003).
12. A.V. Fedorov, A.V. Baranov, I.D. Rukhlenko and Y. Masumoto: "New many-body mechanism of intraband carrier relaxation in quantum dots embedded in doped heterostructures", *Solid State Commun.* **128**, 219 (2003).
13. Y. Masumoto: "Four Kinds of Quantum Beats in Semiconductor Quantum Dots: A Tool to Study the Spin Structure of Quantum Dots", *Extended Abstracts of Int. Symp. on Photonics and Spintronics in Semiconductor Nanostructures*, p.22 (Kyoto, 2003). //INVITED PAPER//
14. I.Ya. Gerlovin, Yu.K. Dolgikh, S.A. Eliseev, V.V. Ovsyankin, Yu.P. Efimov, I.V. Ignatiev, V.V. Petrov, S.Yu. Verbin and Y. Masumoto: "Spin dynamics of carriers in GaAs quantum wells in an external electric field", *Phys. Rev. B* **69**, 035329 (2004).
15. V.K. Kalevich, M. Ikezawa, T. Okuno, K.V. Kavokin, A.Yu. Shiryaev, P.N. Brunkov, A.E. Zhukkov, V.M. Ustinov and Y. Masumoto: "Optical spin polarization of holes in negatively charged InAs/GaAs self-assembled quantum dots", *Physica E* **21**, 1018 (2004).
16. T. Imai and S. Nomura, "Quantum dot array prepared with self-organized nanopore and its photoluminescence spectra", *Physica E* **21** (2-4) 1093-1097(2004).
17. K. Matsuda, T. Saiki, S. Nomura, M. Mihara, Y. Aoyagi, S. Nair and H. Takagahara, "Near-field optical mapping of exciton wave functions in a GaAs quantum dot" *Phys. Rev. Lett.* **91** (24) 177401-1-4 (2003).
18. K. Matsuda, T. Saiki, S. Nomura, M. Mihara, Y. Aoyagi, "Real-space mapping of exciton wave function in a GaAs quantum dot by near-field optical imaging spectroscopy" *Phys. Stat. Sol. (b)* **238** (2) 285-288 (July 2003).
19. K. Matsuda, T. Saiki, S. Nomura, M. Mihara, and Y. Aoyagi, "Real-space mapping of exciton and biexciton wave function of GaAs quantum dot by near-field scanning optical spectroscopy", *Proceedings of the 26 th International Conference on Physics of Semiconductors*, Ed. J H Davies; A R Long , G2.2, (IOP Publishing , Glasgow, 2003).
20. S. Nomura, and Y. Aoyagi, "Density of states of a quantum dot array probed by photoluminescence spectra", *Surface Science*, **529** 171-179 (2003).
21. M. Yamaguchi, S. Nomura, D. Sato, T. Akazaki, H. Tamura, and H. Takayanagi, "Photoluminescence measurements in Be-d-doped back-gate induced quantum well", *Appl. Phys. Lett.* (submitted).

<国際会議>

1. Y. Masumoto, K. Nishibayashi and T. Okuno: "Quantum beat of strain-induced GaAs quantum dots", *Physica E* **21**, 1012 (2004); 11th Int. Conf. on Modulated Semiconductor Structures (Nara, 2003).
2. Y. Masumoto, I.V. Ignatiev, K. Nishibayashi, T. Okuno, S.Yu. Verbin and I.A. Yugova: "Quantum beats in semiconductor quantum dots", *J. Lumin.***108**, 177 (2004); 14th Int. Conf. on Dynamical Processes in Excited States of Solids (Christchurch, 2003).

3. K. Bando, T. Sawabe and Y. Masumoto: "Room-temperature excitonic lasing from ZnO single nanobelts", *J. Lumin.* **108**, 385 (2004); 14th Int. Conf. on Dynamical Processes in Excited States of Solids (Christchurch, 2003).
4. Y. Masumoto: "Four Kinds of Quantum Beats in Semiconductor Quantum Dots: A Tool to Study the Spin Structure of Quantum Dots", Extended Abstracts of Int. Symp. on Photonics and Spintronics in Semiconductor Nanostructures, p.22 (Kyoto, 2003). //INVITED PAPER//
5. Y. Masumoto, I.V. Ignatiev, K. Nishibayashi, T. Okuno, S.Yu. Verbin and I.A. Yugova: "Quantum beats in semiconductor quantum dots", 1st Int. Tsukuba-Symp. on Nanoecience (Tsukuba, 2003).
6. K. Bando, T. Sawabe and Y. Masumoto: "Room-temperature excitonic lasing from ZnO single nanobelts", 1st Int. Tsukuba-Symp. on Nanoecience, (Tsukuba, 2003).
7. T. Okuno, Y. Masumoto, S. Fujitani, H. Yoshino, N. Yoshinari, H. Bando, H. Okamoto: "Absorption saturation intensity and response time of InGaAs/InAlAs MQW under tensile and compressive strains", The 10th International Workshop on Femtosecond Technology (FST2003) Chiba, Japan June 16-17, 2003 Abstracts p.123.
8. S. Nomura, "Detecting spin polarization of electrons in quantum dot edge channels by photoluminescence", International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics, (1-4 Mar. 2004, Atsugi).
9. D. Sato, S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, and H. Takayanagi, "Electron density dependence of photoluminescence from Be-delta-doped GaAs quantum wells with a back gate", International Symposium on Mesoscopic Superconductivity and Spintronics, (1-4 Mar. 2004, Atsugi).
10. K. Matsuda, T. Saiki, S. Nomura M. Mihara, and Y. Aoyagi, "Near-field optical spectroscopy of GaAs quantum dots", The 1st International Tsukuba-Symposium on Nanoecience, (17-18 Nov, 2003, Tsukuba).
11. S. Nomura and Y. Aoyagi, "Spin polarization of electrons at odd filling factors in quantum dot superlattice", The 1st International Tsukuba-Symposium on Nanoecience, (17-18 Nov, 2003, Tsukuba).
12. S. Nomura and Y. Aoyagi, "Spin polarization of electrons in lateral periodic potential around filling factor  $\nu=3$ ", The 15th International Conference on the Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, (14-18 July. 2003, Nara).
13. T. Imai and S. Nomura, "Quantum dot array prepared with self-organized nanopore and its photoluminescence spectra", The 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures, (14-18 July. 2003, Nara).

<学位論文>

物理学研究科博士論文

1. 西林一彦: "Electronic states and their spin structures of strain-induced GaAs quantum dots"

数理物質科学研究科物質創成先端科学専攻修士論文

1. 丸山理: "Circularly polarized laser spectroscopy of strain-induced GaAs quantum dots"

理工学研究科理工学専攻修士論文

1. 沢辺大樹: "ZnO ナノ構造の作製と光物性"



2. 今井剛：“アルミナ規則ポーラス構造を用いた量子ドットアレーの発光分光”

<講演>

1. 樋口彰、高橋了、吉野英生、坂東弘之、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章：“ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  歪量子井戸構造における光吸収飽和特性” 応用物理学会（2003年8月）
2. 高橋了、樋口彰、吉野英生、坂東弘之、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章：“低温 MBE 成長 Be ドープ InGaAs 薄膜及び InGaAs/InAlAs MQW における吸収飽和励起光密度の波長依存性” 応用物理学会（2003年8月）
3. 池沢道男、舛本泰章：“光ヘテロダイナ法による半導体量子点における FWM 信号検出” 日本物理学会（2003年9月）
4. 菅野敦史、舛本泰章：“銅ハライド量子点のスピンの緩和” 日本物理学会（2003年9月）
5. 阪東一毅、沢辺大樹、舛本泰章：“ZnO ナノバルトのレーザー発振特性” 日本物理学会（2003年9月）
6. V.K. Kalevich, M. Ikezawa, A.Yu. Shiryaev, A.Yu. Egorov, V.M. Ustinov and Y. Masumoto : “Influence of strain-induced valence band-splitting on optical orientation in dilute  $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$  alloys” 日本物理学会（2003年9月）
7. Y. Chen, T. Okuno and Y. Masumoto : “Relaxation of carriers in CdTe self-assembled quantum dots in the magnetic field” 日本物理学会（2003年9月）
8. 丸山理、舛本泰章：“歪誘起 GaAs 量子ドットの円偏光励起スペクトル” 日本物理学会（2003年9月）
9. 舛本泰章、西林一彦、奥野剛史：“歪誘起 GaAs 量子ドットにおけるスピン量子ビート” 日本物理学会（2003年9月）
10. 舛本泰章、池沢道男、奥野剛史、I.V. Ignatiev, S. Yu. Verbin : “電子がドープされた InP 量子ドットの示す長時間スピン偏極” 日本物理学会（2003年9月）
11. 舛本泰章、V.K. Kalevich、池沢道男、奥野剛史、A.Yu. Shiryaev, K.V. Kavokin, P.N. Brunkov, A.E. Zhukov, V.M. Ustinov : “電子ドープ InAs 量子ドットの円偏光メモリー” 日本物理学会（2004年3月）
12. 丸山理、池沢道男、舛本泰章：“結合 GaAs 量子井戸に形成される歪誘起量子ドットの円偏光励起スペクトル” 日本物理学会（2004年3月）
13. 池沢道男、舛本泰章：“歪誘起 GaAs 量子ドットのフォトンエコー” 日本物理学会（2004年3月）
14. 徳永英司、小林孝嘉、李定植、西研一、舛本泰章：“マルチチャンネルロックインによる単一量子点の非線形吸収分光” 日本物理学会（2004年3月）
15. 須藤史敬、池沢道男、舛本泰章：“単層 InP 量子ドットにおけるフォトンエコー” 日本物理学会（2004年3月）
16. 坂東弘之、野口あゆみ、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章：“InGaAs/InAlAs MQW における外部応力による吸収飽和励起光密度の変化”，応用物理学会（2004年3月）
17. 吉田道弘、高橋了、坂東弘之、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章：“MBE 成長 InGaAs/InAlAs MQW における電界効果による吸収飽和励起光密度の低減”，応用物理学会（2004年3月）
18. 高橋了、吉野英生、坂東弘之、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章：“低温 MBE 成長 Be ドープ InGaAs 薄膜における吸収飽和励起光密度の波長特性”，応用物理学会（2004年3月）

19. 樋口彰、坂東弘之、岡本紘、奥野剛史、舛本泰章：“低温 MBE 成長 Be ドープ GaAs 薄膜における  $\text{Be}^-$ - $\text{As}_{\text{Ga}}^+$  複合欠陥による発光再結合”，応用物理学会（2004 年 3 月）
20. 中村俊輝、阪東一毅、舛本泰章、小林俊介、佐々木史雄、堀田収：“(チオフェン/フェニレン) コオリゴマー結晶の低温における光物性” 応用物理学会（2004 年 3 月）
21. 阪東一毅、沢辺大樹、舛本泰章：“単一 ZnO ベルト状ウィスカー結晶の室温励起子レーザー発振” 応用物理学会（2004 年 3 月）
22. 野村晋太郎、量子ドット端状態の電子スピン偏極度の光学検出、日本物理学会年次大会、福岡市、2004 年 3 月。
23. 佐藤大輔、野村晋太郎、山口真澄、赤崎達志、田村浩之、高柳英明、ゲート付き Be-d ドープ GaAs 量子井戸発光の電子密度依存性、日本物理学会年次大会、福岡市、2004 年 3 月。
24. 松田一成、齋木敏治、野村晋太郎、青柳克信、ホール局在した n 型量子ドットアレーの近接場発光イメージング、光物性研究会（大阪市立大）、大阪市 2003 年 12 月 5-6 日。
25. 野村晋太郎、「量子ドット超格子の光機能探索」、平成 15 年度・東北大電気通信研究所プロジェクト研究会「ナノ成長場制御による構造と機能」仙台市、2003 年 10 月。
26. 松田一成、齋木敏治、野村晋太郎、青柳克信、ホール局在した n 型量子ドットアレーの近接場発光分光、日本物理学会秋季大会、岡山市、2003 年 9 月。
27. 今井剛、山本貴一、野村晋太郎、規則ポアソン構造を用いた量子ドットアレーの発光分光 II、日本物理学会秋季大会、岡山市、2003 年 9 月。