

**(独) 科学技術振興機構
創造科学技術推進事業
追跡評価用資料**

**ERATO
樽茶多体相関場プロジェクト
(1999-2004)**

2010. 5. 10

目次

目次.....	1
報告書要旨.....	3
樽茶多体相関場プロジェクトの展開状況(図).....	6
第1章 プロジェクトの概要.....	7
1.1 はじめに.....	7
1.2 量子ドット、量子細線中の電子相互作用.....	8
1.2.1 量子ドットのフント則と電子スピン.....	9
1.2.2 量子ドットの近藤効果.....	11
1.2.3 2重結合量子ドット（人工分子）.....	12
1.2.4 量子細線のクーロンドラッグ.....	14
1.3 量子ドットの電子と核スピンの相互作用.....	14
1.3.1 縦型2重量子ドットのパウリ則に基づくスピンプロケード.....	15
1.3.2 量子ドットの電子・スピンのダイナミクス.....	16
1.4 量子情報処理に関する新しい量子デバイス開発.....	17
1.4.1 導波管型 ESR 法を用いたデコヒーレンス時間 T2 解析.....	17
1.4.2 量子ドット中の一電子スピンの読み出し.....	17
1.4.3 ゼーマン効果による長い緩和時間 T1 の作成.....	18
第2章 プロジェクト終了から現在に至る状況.....	20
2.1 量子情報処理デバイスのための量子ドット制御.....	20
2.1.1 単一電子のスピン制御.....	20
2.1.2 結合量子ドットの電子状態制御.....	22
2.1.3 核スピン検出と制御.....	23
2.1.4 量子ドットのスケールビリティ.....	24
2.1.5 まとめ.....	24
2.2 量子ドット結合系の電子相関と量子コヒーレンス.....	25
2.2.1 量子細線結合系の電子相関.....	25
2.3 プロジェクトメンバーの活動状況.....	26
第3章 プロジェクト成果の波及と展望.....	27
3.1 科学技術への波及と展望.....	27
3.1.1 量子情報処理デバイスの実現.....	27
3.1.2 電子強相関系の物理.....	28
3.1.3 プロジェクトの論文から見たインパクト.....	29
3.2 社会経済への波及と展望.....	35

3.2.1 量子情報社会への展望.....	35
参考文献	38

報告書要旨

プロジェクトの総括責任者によって低次元（0次元や1次元）の半導体、いわゆる人工原子や量子細線が開発され、自然の原子では扱えない広範囲のパラメータを変化させ電子状態を詳細に研究する道が開かれた。特に半導体量子ドットによる人工原子では、トンネル障壁と電極へ掛ける電圧により電子の量子ドットへの注入を1個ずつ制御する技術が開発され（クーロンブロッケード）、人工原子中の電子を詳細に研究することができるようになった。プロジェクトでは人工原子中の電子のスピンによる多彩な近藤効果が明らかになった。すなわち、電極中の電子のスピンと量子ドット中の電子スピンの強い相関関係によりこの現象が起こることを実証した。さらに、1重項と3重項の縮退による偶数個の電子で起こる近藤効果の観測や、理論的な極限であるユニタリー極限の近藤効果を実現するなど多くの成果を得た。

さらに、人工原子2個を縦や横に並べた人工分子の構造を開発し、量子ドット間の相互作用を詳しく研究した。量子ドット間の結合を制御するゲートによって、2個の量子ドットの結合を制御することができ、自然の分子の共有結合やイオン結合と似た結合を得ることができた。また、磁場中の2個の量子ドットのスピン状態によって、2個のドットに流れる電流に整流作用、すなわち、電流が殆ど流れない状態を観測した。詳細な検討からパウリ則によるスピントラップ現象を発見した。この結果がスピンの読み出し技術に展開した。

2重量子ドットの電子のクーロン振動の状況を詳細に調べると、クーロン相互作用とトンネル結合により、アンチクロッシングと呼ばれるドット間で電子を共有する領域が生じた。すなわち、左のドットへ1個電子を追加した後、この領域を通過するように電極電圧を制御すると、ドット間で1個の電子を共有した後、右のドットへ電子が移動する。アンチクロッシング領域の間隔を中央の電極で制御して、狭くするとクーロン反発が増大し、トンネル結合が弱くなる。逆に広くするとクーロン反発が小さくなり、トンネル結合が強くなることが分かった。

量子細線の研究では、従来理論的に言われていた量子細線の正のクーロンドラッグ現象を観測した。さらに、磁場が強く、電子数が少ない領域で負のクーロンドラッグも見出した。これらのクーロンドラッグ現象はプロジェクトで始めて、実験的に検証された。

磁場の下で縦型2重量子ドットの電流を調べるとスピンのパウリ則によって殆ど電流が流れない現象、スピントラップを発見した。その機構を明らかにすると同時に、スピントラップ領域で核スピンとの大きな相互作用を発見した。スピントラップはスピンの読み出しに使える可能性がある。また、発見した核スピンとの相互作用を使うと、電圧により核スピンを強く分極できる新しい現象が分かった。核スピンの制御に使える可能性を発見した。

量子情報処理に関する新しいデバイス開発を目指して、電子スピンの制御のために導波管型電子スピン共鳴により基礎的な実験を行った。そして、従来電子スピンの磁気モーメントが余りに小さくて成功していなかった 1 電子スピンの検出に「スピン-電荷変換」という方法で初めて成功した。この技術は電子スピンを使う量子情報処理の課題の 1 つであったが、その課題を 1 つ解決したことになる。量子情報処理に必要な 1 個電子スピンの緩和時間 T_1 をゼーマン効果と特殊な電圧パルス、電流測定によって確認した。得られた緩和時間 200 マイクロ秒は量子情報処理には十分長い時間である。

これらの成果を要約すれば、量子ドットへの電子の入り方からスタートした人工原子や量子細線のような低次元の半導体について、様々な角度からの研究が行われ、物理的に深くて多様な理解へと進展を果たしたと言える。これらの成果の中から、量子情報処理デバイスに関係するテーマに重点化して展開したのが、SORST（課題名：人工原子・分子の量子スピン情報）、ICORP（課題名：量子スピン情報）での研究である。この中で、基礎的な研究として量子細線や近藤効果の研究も継続した。

SORST(人工原子・分子の量子スピン情報)では量子ドット中の電子スピンを量子ビットとし、量子演算の基本となる技術を開発するための研究を行った。さらに ICORP (量子スピン情報) ではオランダのデルフト大学とスイスのバーゼル大学を加えた国際協同研究として同じ研究内容を引き継いだ。

量子演算には 1 量子ビットの自由な制御と 2 量子ビットによる量子もつれ状態の制御が必要であり、その実現手段のためのデバイス構造、実現手段の研究を行った。その結果、微細な固体デバイス上で実現可能な傾斜磁場による電子スピン共鳴手法を開発し、量子ドット中の電子スピン 1 個を制御するための制御技術の基礎ができた。また、プロジェクトで開発した人工分子構造において、2 個の電子を 2 個の量子ドットにそれぞれ各 1 個ずつ分配し、2 つの電子スピんに量子もつれが存在する状態（ハイトラー・ロンドン状態）を見だし、2 量子ビットの演算のための基礎ができた。その他、電子スピンのデコヒーレンスと深く関係し、重要な電子スピンと核スピンの相互作用についても、電圧パルスで核スピンの分極を制御する新しい現象を発見した。結果として、量子情報処理の固体デバイスとしての要素技術の基礎を開発し、これらの要素を組み合わせた実際のデバイス開発まで進展させた。超伝導ジョセフソン素子の方式と並んで、量子ドットの方式を固体による量子情報処理デバイス候補へ押し上げたのはプロジェクト及びそれ以後の研究成果である。

量子細線等の基礎物理においても、量子細線の負のクーロンドラッグが電子が規則正しく並んだウィグナー結晶状態によって説明できることを示すなどプロジェクトの成果を発展させた。

今後の展望として、量子ドットによる量子情報処理は現在、要素技術の基礎ができた段階であり、今後それらの成果を組み合わせる実際に動作するデバイスが期待される。幸い 2010 年の「先端研究助成基金」に採択され、継続して研究が行われる予定である。

科学技術としては、量子情報処理のデバイス以外にも量子もつれ等の量子現象を使った量子限界以下の高感度検知器の応用などが考えられ、量子力学による思いがけない応用も期待される。また、量子ドットや量子細線の物理現象は0次元、1次元という低次元の物理を探究する良きモデルとなっている。これまでの研究で相当深く現象が分かってきたばかりか、新しい現象も発見されて、ますます興味ある展開が期待できる。

量子情報処理は実現すれば社会に大きなインパクトがあると予想されている。量子コンピュータとして、タンパク質の立体形の予測問題や社会経済の最適化問題等が計算できる。しかし、その実現には数十年掛かると考えられている。規模の小さい量子コンピュータは量子中継等への応用が見込まれており、もっと早い時期の実現が期待されている。一方、ベンチャー企業が量子コンピュータの実現を2007年に発表するなど、予想外の急速な動きがあり、予想より実現の時期は早いかもしれない。

以上

樽茶多体相関場プロジェクトの展開状況(図)

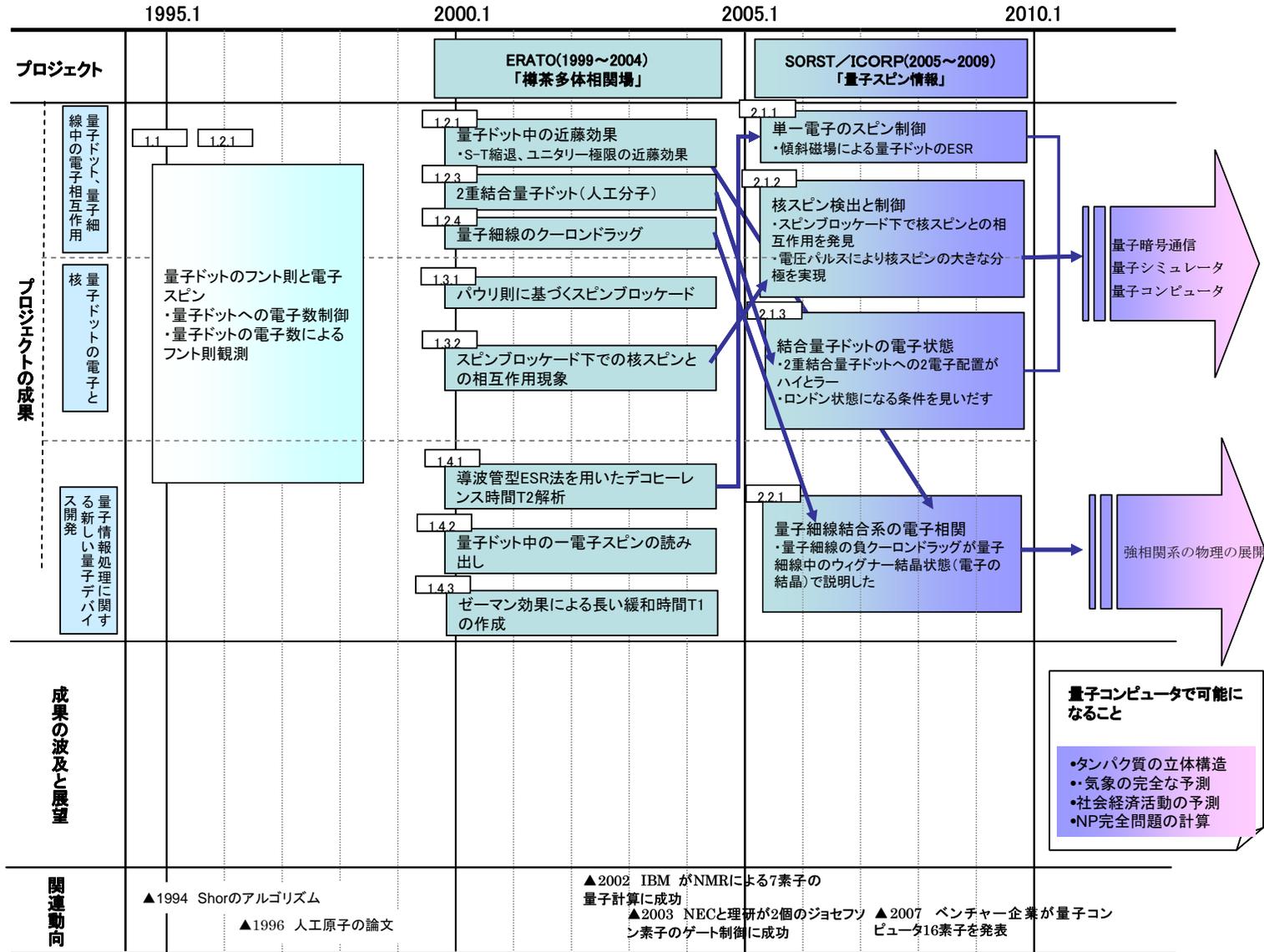


図 プロジェクトの展開状況(まとめ図)

第1章 プロジェクトの概要

1.1 はじめに

20世紀後半の物理として、固体や液体の現象を量子力学によって解明する方向がある。ヘリウム (4He) の超流動や金属超伝導はボーズ粒子系の典型的な相互作用効果に由来する現象として早くから知られている。最近では、酸化物超伝導の発見を契機として、従来難問として避けられてきた多体効果、すなわち粒子相関の問題が正面から取り上げられるようになってきた。一方、フェルミ粒子の代表である電子系についても、ボーズ粒子とは質的に異なる粒子相関現象が現れることが分かってきた。これらの相互作用系では、粒子間の相関を反映した多粒子状態が系の性質を決めるうえで重要な役割を果たす。しかし、その多くはボーズ粒子系に関するもので、フェルミ粒子系については、ほとんど研究が進んでいない。

プロジェクトでは、相関効果が顕著に現れる半導体低次元構造、すなわち理想的な単位構造として、0次元電子系（人工原子¹）など、1次元電子系を選び、そしてその中でのコヒーレント性と電子相関の関係を明らかにすることを目指した。さらに、これらを、それぞれ複数個組み合わせることにより、よりマクロなスケールの電子相関で支配される秩序状態を実現し、その量子力学的性質を明らかにする。

本研究により、巨視的秩序構造を舞台として、いわゆる"強相関係"の多体効果の解明や、さまざまな量子力学的基本仮説の検証が進められるだけでなく、異種物質を微細に組み合わせた構造における新しい粒子相関現象の発見を期待した。これらの成果をもとに、例えば、電子のコヒーレント状態を利用した量子暗号処理や量子論理ゲート、などの新しいデバイス概念の出現なども目標とした。

プロジェクトでは、樽茶総括責任者が開発した量子ドットを中心に、低次元半導体デバイスの中に閉じこめられた電子の相関効果の探求を目指した。電子を量子ドットのような微小空間に入れると「電荷をもつ量子」としての姿が現れ、そこでは1個単位で電子状態を識別・操作することができる。プロジェクトでは、半導体の微小構造を作り、電子の量子力学的性質、特に低次元系特有の相関現象、外界の粒子（原子核、フォノンなど）との相互作用、量子情報処理の物理を探究した。

成果として、原子に類似の単一量子ドット（人工原子）、それを複数個結合した人工分子を作り、電子数を零から順に増やした時の電気伝導の変化を調べることによって、人工原子におけるフント則の一般性、人工分子におけるパウリ効果、分子的電子状態の存在などを検証した。また、電子スピン状態を厳密に制御することにより、数々の多様

¹ 電子を半導体微小空間に閉じこめたもので、その中の電子は実際の原子中の電子に類似した振る舞いをする。

な近藤効果を発見し、人工原子の近藤物理の世界を開拓した。さらに、スピン交換結合制御や単一電子スピンの読み出し実験に成功し、電子スピンを使った量子情報処理実現への道を開いた。

プロジェクトでは、(1) 低次元電子相関、(2) 異種粒子相関、(3) 量子輸送コヒーレンスの3グループを設置し、相互に緊密な連携を保ちつつ研究を展開した。それぞれのグループでは、一次元、零次元の強い電子相関構造の作成と多体相関の研究、異種物質の微細構造の作成と異種粒子間の相関効果の抽出の研究、量子輸送における相関とコヒーレンスの研究を有機的に組み合わせて行った。

研究成果は次の4つの領域にまとめられる。

- (1) 研究領域Ⅰは量子ドット、量子細線の閉じ込められた電子の相互作用の研究である。
- (2) 研究領域Ⅱは量子ドットに閉じ込められた電子と他のエネルギー物質、例えば、フォノン、フォトンや核スピンとの相互作用の研究である。
- (3) 研究領域Ⅲは新しい量子デバイスの開発とナノ量子領域探索技術の開発の研究である。
- (4) 研究領域Ⅳは量子輸送特性と量子情報処理に関する新しい量子デバイス開発の研究である。

1.2 量子ドット、量子細線中の電子相互作用

量子ドット、量子細線に閉じ込められた電子の相互作用の研究である。単一量子ドットに閉じ込められた電子は、電圧と磁場により正確に制御できる。それ故、例え電子相関効果現象が複雑であっても、電気特性から求まる電子相関効果の結果は、実験的、理論的な両面から正しく同定することができる。この単一量子ドットの蓄積された知識にもとづき、研究領域は結合量子ドット（人工分子）や量子ドットとリード間の強結合系へと広がって行った。この系のトンネリングや交換結合現象の探索を通して、近藤効果、コトンネリング、分子状態等の新しい物理に成果があった。

量子細線に関する研究については、朝永-ラッティンジャー液体²、に關与する1次元相互作用に研究成果を得た。

² 朝永-ラッティンジャー液体：一次元伝導体における相互作用する多粒子電子系（または他のフェルミ粒子系）における量子液体である。この模型を朝永-ラッティンジャー模型と呼ぶ。

1.2.1 量子ドットのフント則³と電子スピン

総括責任者は 1996 年の有名な論文⁴で図 1⁵の縦型量子ドットによる人工原子の電子の状態を明らかにし、実際の原子でよく知られたフント則を人工原子において初めて実証した。図 1 の量子ドットの構造はプロジェクトやその後の展開の基礎となる重要な構造なので少し詳しく説明する。人工原子では半導体の 2 重障壁構造^{6*}を利用して円盤状の構造を作る。2 重障壁構造は高いポテンシャルを持つ 2 つの障壁層と、その間に挟まれた幅 $0.01 \mu\text{m}$ 程度の井戸層でできている。井戸層の幅は電子の波長に比べて十分小さいので、電子は障壁ポテンシャルで強く閉じこめられて 2 次元的になり井戸層の面内のみで運動する。さらに、2 重障壁構造を円柱状に切り取り、その側面にゲート電極を付ける。このゲートにかける電圧を制御することで、井戸層の面内で電子を閉じこめる、2 次元的な回転対称引力型ポテンシャル（以後“くぼみ”と呼ぶ）を作ることができる。“くぼみ”は中心に向かって放物形になり、有効直径 $0.1 \mu\text{m}$ 程度が実現できる。さらにゲート電圧を精密に制御して“くぼみ”の大きさを少しずつ変えると、その中電子を 1 個入れることができる。一旦電子が入るとクーロン力反発のため、続けて次々に入ることはない（クーロンブロッケードと呼ぶ）。この操作を繰り返すこと

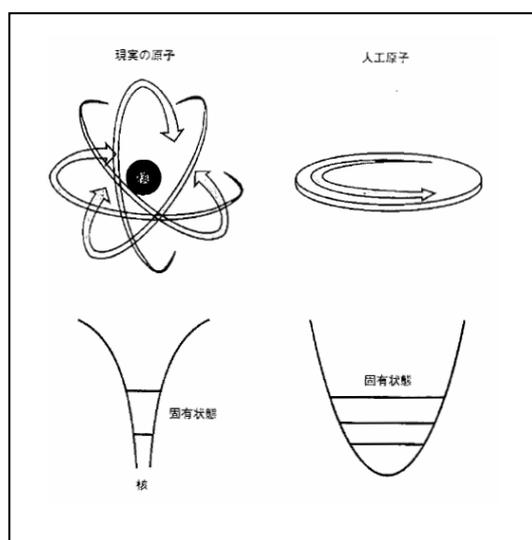


図 1 人工原子の模式図

により“くぼみ”に入る電子を 1 個ずつ正確に変えていくことができる。これにより、1 個電子が入ると原子番号 1、2 個入ると原子番号 2 というように、高さ $0.01 \mu\text{m}$ 、有効直径 $0.1 \mu\text{m}$ のディスク内に、電子だけでできた人工原子を次々と作り出すことができる。人工原子の放物形のポテンシャルにおける動径方向量子数 n と軌道角運動 l は計算することができ、エネルギーの縮退は電子数 2 個、6 個、12 個等の決まった数になり、

³ フント則：電子が原子に配置されるとき、エネルギーが低い状態から電子が配置されて行く。同一のエネルギー状態を殻と呼び、殻に配置される電子の数は殻に応じて決まっている。同一殻に配置される電子は交換相互作用のために、スピンの揃った状態に優先的に配置される。このような電子配置に関するスピンの規則をフント則という。

⁴ Tarucha, S., et al.: *Phys. Rev. Lett.* 77, 3613-3616, 1996

⁵ 図 1：樽茶清悟, *パリティ*, Vol.13, No.09, 15-20, 1998

⁶ 2 重障壁構造：2 種類の異なる半導体を接合すると、その接合部で電子にとってのポテンシャルの段差が生じる。2 重障壁構造は、高いポテンシャルを与える半導体（障壁層）で低いポテンシャルを与える半導体（井戸層）を挟んだものをいう。井戸層の幅を電子の波長程度以下に薄くし、障壁を十分高くすると、電子は井戸の中に強く閉じこめられて量子化する。

それぞれ閉殻となることがわかる。フント則を同一殻内の電子に適用すれば、第2殻では4個の電子で平行スピンだけの半閉殻になり、安定なエネルギー準位を作る。第3殻では9個の電子が、第4殻では16個の電子がそれぞれ半閉殻になる。

ゲート電圧を変えながら流れる電流を測定したのが図27である。ゲート電圧により、量子ドットへ1個ずつ電子が加わって行くときの電流ピークが測定されている。このような現象をクーロン振動と呼ぶ。電子数2個から3個、6個から7個、12個から13個へ増えるにつれてゲート電圧間隔が広がっているのが分かる。ゲート電圧はエネルギー準位と対応しているので、それぞれの個数の電子から次の電子への個数増加に大きなエネルギーが必要だということを示している。電子数2個、6個、12個はこの人工原子の閉殻となる電子数である。さらに、半閉殻の電子数においても、ゲート電圧の間隔の広がりが測定された。

さらに、この量子ドットに磁場を加えてその変化を測定した。磁場を加えると人工原子の放物形閉じこめが弱いため、エネルギー準位が量子数 n 、 l の軌道に関する量子数を反映して、磁場で敏感に変わる。そのため、電子の量子状態 n と l を具体的に決めることができる。図38はその例である。図3では3、4、5番目の電流ピークを印加磁場0から2テスラで測定した。電子数 N と各電子のスピンの向きも決定でき、電子が各軌道にペアで配置されていることも実証できた。磁場中なのでフント則に反してすべてが平行、反平行のペアのように見えるが、 $\mu(4)$ と $\mu(5)$ の0.4テスラ付近以下ではスピンの反平行になり、スピン軌道相互作用によりフント則が成立していることが確かめられた。

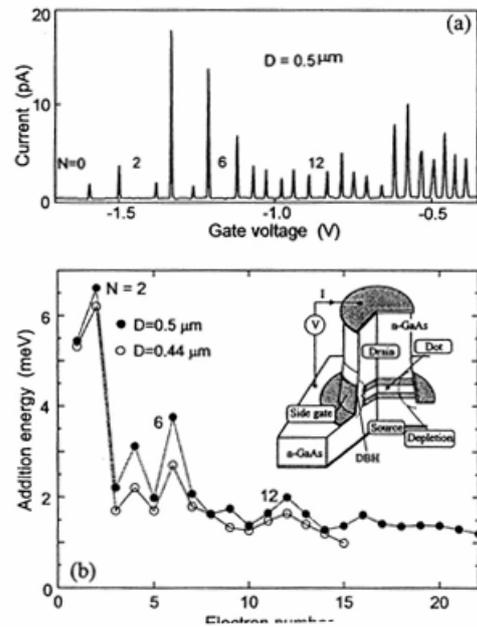


図2 クーロン振動の測定。電子の増加数によってゲート電圧の間隔が広い数が存在する。

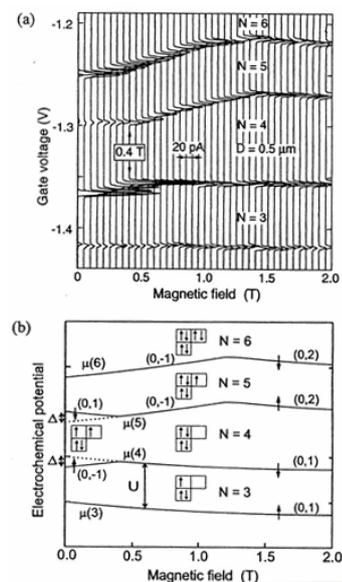


図3 電子数4個から5個に増加する時、磁場が0.4テスラ以下でフント則が成立。

7 図2：脚注4の論文から。

8 図3：脚注4の論文から。

1.2.2 量子ドットの近藤効果

近藤効果は磁性不純物によって電気抵抗が低温で極小値を取る現象を理論的に解明したもので、解明した近藤淳に因んで名付けられた効果である。この効果は通常強磁性体不純物によるスピンと伝導電子のスピン相互作用の結果、伝導電子が磁性不純物のスピンによって散乱され抵抗が大きくなる現象として知られている。磁性不純物のスピンに限らずスピンによる伝導現象への影響が近藤効果の本質である。量子ドットでの近藤効果とは、量子ドットに閉じこめられた電子のスピンと電極電子のスピン相互作用によって、伝導度が大きくなる現象である。模式図を図 4⁹⁾に示す。図 4 の中央が量子ドットを示し、左右の電極との間にはトンネル障壁がある。通常、電子の個数が変化する瞬間の電流ピークが測定され、個数が一定の間、クーロンブロッケードにより電流が生じない。

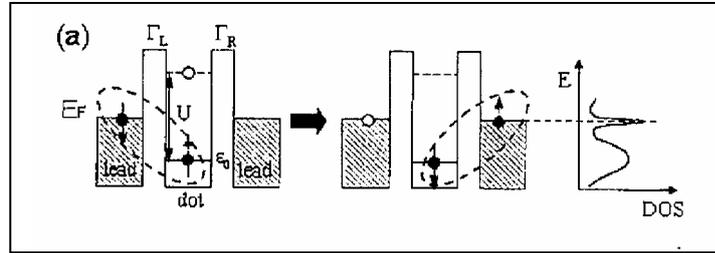


図 4 近藤効果の模式図。ドットの電子のスピン相互作用により、ドット電子が右電極へ出て行くと同時に左電極から逆向きのスピンの電子がドットへはいる。コトンネリングという。

しかし、量子ドットの電子が奇数個の場合、量子ドット内の上向きスピン電子が右の電極へ出て行くと同時に左の電極の下向きスピンの電子が量子ドットへ入ってきて電流が生じる現象が起こる。これを量子ドットの近藤効果と言う。この現象はある温度（近藤温度と呼ぶ）以下で生じること、量子ドット内の電子スピン 1/2、すなわち奇数電子

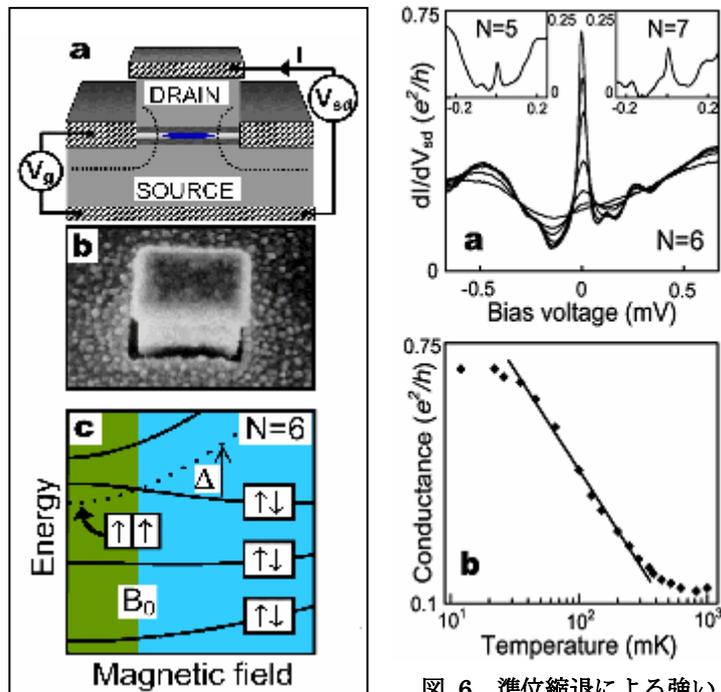


図 5 準位縮退による強い近藤効果。縦型ドットと準位縮退の模式図

図 6 準位縮退による強い近藤効果。上図は測定結果。下図は導電率の対数プロット。近藤効果特有の対数的な変化を示す

⁹⁾ 図 4 : Sasaki, S., et al, *J, Phys. Soc. Jpn.*, 74, 88-94, 2005

数で起こることが知られていた。

プロジェクトにおいて、量子ドットの近藤効果について様々な新しい現象を見いだした。特に、次の二つの成果が注目された。

- (1) 準位縮退効果による強い近藤効果の発見
- (2) ユニタリ極限での近藤効果

(1)では、従来奇数電子でしか観測されなかった近藤効果が偶数電子でも起こることを初めて発見した。すなわち、縦型量子ドット (図 5¹⁰) において、適当な磁場を掛けると1重項準位と3重項準位をほぼ同じエネルギーに縮退させることができ、強い近藤効果を観測した (図 6¹¹)¹²。

また、近藤効果の理論によると近藤効果による伝導度の最大値は $2 \times e^2/h$ であることが予測されていた。量子ドットの近藤効果は、低温極限においてこの最大値であるユニタリ極限を示した (図 7¹³)¹⁴。

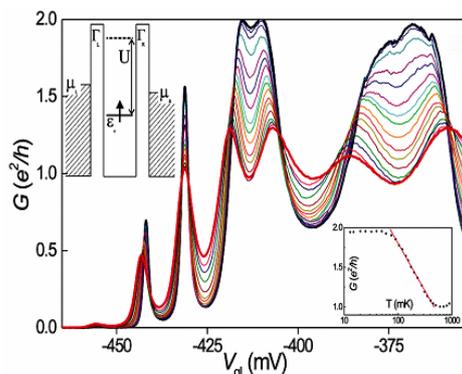


図 7 近藤効果のユニタリ極限を示す実験結果。低温で理論上の最大値であるユニタリ極限、 $2e^2/h$ を観測した。

1.2.3 2重結合量子ドット (人工分子)

量子ドットを2個結合した系として、縦型結合量子ドットデバイスと横型結合量子ドットデバイスを開発し、その電子状態について研究した。

縦型結合量子ドットデバイスではトンネル結合に寄与する準位が明確に判明しており、特に強い結合系ではある磁場領域で反結合状態の電子占有に起因した分子的な状態 (分子相) を観測した。また、弱い結合系では、後に述べるスピンプロケードの現象が観測された。

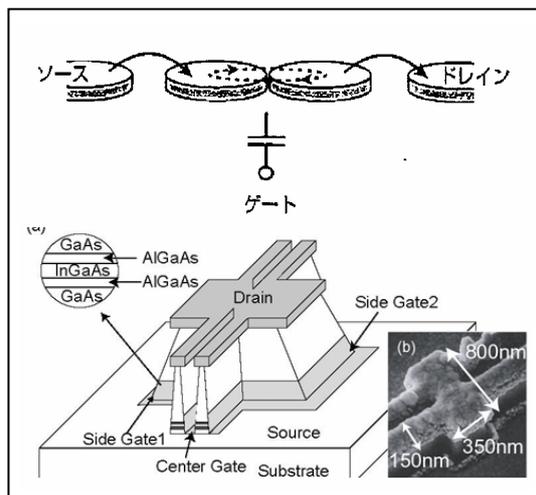


図 8 横型結合量子ドットデバイスの模式図と実際のデバイス。

¹⁰ 図 5 : JST ホームページ「樽茶多体相関場プロジェクト」研究成果集より

¹¹ 図 6 : JST ホームページ「樽茶多体相関場プロジェクト」研究成果集より

¹² Sasaki S, et al., *Nature*, 405, 764-767, 2000

¹³ 図 7 : JST ホームページ「樽茶多体相関場プロジェクト」研究成果集より

¹⁴ van der Wiel WG, et al., *Science*, 289, 2105-2108, 2000

横型結合量子ドットデバイス(図 8¹⁵)では、模式図で表される系の詳細を研究した。この系では、2つのドットへ独立に電子を1個ずつ供給できるばかりでなく、中央ゲートによって2つのドットの結合を制御できる。2つのドットのクーロン振動を測定すると静電反発に加えて2つのドットのトンネル結合に由来する量子力学上の反発のため、アンチクロッシングと呼ばれる特有のパターンが生じる¹⁶。実際の測定結果が図 9¹⁷である。四角や丸で囲んだ領域でアンチクロッシングが起こっている。さらにこれらの領域における、アンチクロッシングの間隔の平均と分散を調べたのが図 10¹⁸である。中央ゲート電圧によって、アンチクロッシング間隔を広げる (ΔV が大) と分散が小さくなり、狭くする (ΔV が小) と分散が増大する。このことは、アンチクロッシングの間隔狭くなると、静電反発が支配的になり、トンネル結合の影響が小さくなることを示している。すなわち、中央ゲート電圧の制御により量子力学的なトンネル結合を制御できる。デバイスのゲート電圧と磁界強度でこのトンネル結合の度合いが調整可能であるため、将来の量子計算に必要な量子ビットデバイスの可能性を確認した。2電子のトンネル結合と交換結合状態を、局在状態密度近似(LDA) 計算法を用いて解析した結果、それぞれのドットに電子が1個ずつ局在し、スピンの反平行の状態(水素分子では Heitler-London 状態として知られている) が安定な基底状態であることが分かった。結合ドットの2つの電子のスピンを制御するための有意義なデバイス構造の知見を得た。

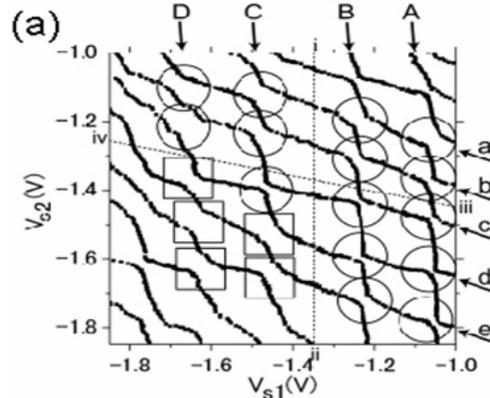


図 9 横結合型量子ドットデバイスにおクーロン振動とアンチクロッシング

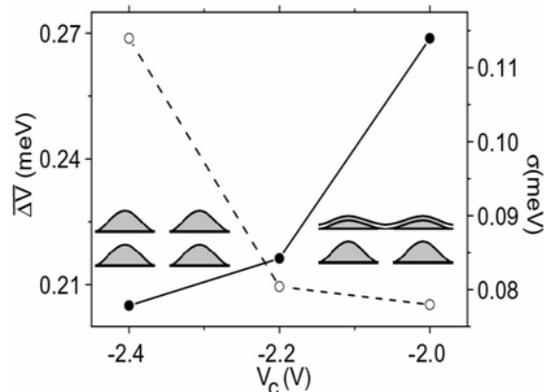


図 10 アンチクロッシングの間隔の平均と分散。センターゲート電圧を関数としてアンチクロッシングの平均値と発散値を求めた。統計的に図 9 内の丸領域と四角領域のアンチクロッシングから導き出した。

¹⁵ 図 8 : JST ホームページ「樽茶多体相関場プロジェクト」研究成果集より

¹⁶ Hatano, M. et al., *Phys. Rev. Lett.* 93, 066806, 2004

¹⁷ 図 9 : JST ホームページ「樽茶多体相関場プロジェクト」研究成果集より

¹⁸ 図 10 : JST ホームページ「樽茶多体相関場プロジェクト」研究成果集より

1.2.4 量子細線のクーロンドラッグ

従来、電気伝導における相互作用効果（朝永-ラッティンジャー液体効果:TLL 効果）の実験は、伝導測定に限られていた。プロジェクトでは、2本の長い半導体細線を並列に結合させた試料を用いて“クーロンドラッグ”（片方の細線（ドライブ細線）に電流を流したとき、細線間での運動量の交換を介して他方の細線（ドラッグ細線）に電圧が発生する現象）の実験を行った¹⁹（図 11²⁰）。これまでに、朝永-ラッティンジャー液体特有の現象として、低温、低電子密度領域において2本の細線が互いに相互作用して強いドラッグ効果が生じることを確認した（図 12²¹）。また、両方の量子細線の電子濃度が低い場合に負のドラッグ現象、すなわち逆方向の電流を観測した（図 13²²）。

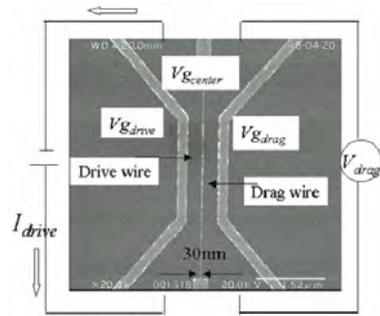


図 11 実験に使われた量子細線

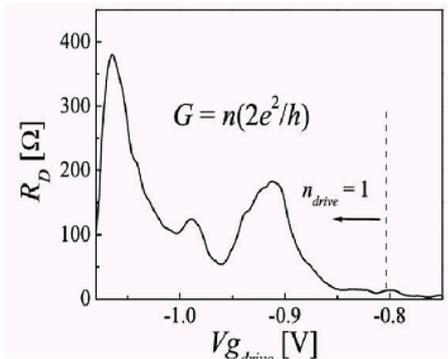


図 12 量子細線に生じる正のドラッグ現象。

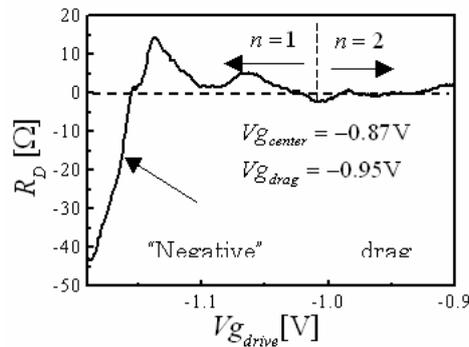


図 13 量子細線に生じる負のドラッグ現象。

1.3 量子ドットの電子と核スピンの相互作用

量子ドットに閉じ込められた電子と他のエネルギー物質、例えば、フォトンや核スピンの相互作用の研究である。電子スピン自由度は外部環境からよく分離されていると

¹⁹ M.Yamamoto, et al., *Physica E*, 12, 726-729, 2002

²⁰ 図 11 : JST ホームページ「樽茶多体相関場プロジェクト」研究成果集より

²¹ 図 12 : JST ホームページ「樽茶多体相関場プロジェクト」研究成果集より

²² 図 13 : JST ホームページ「樽茶多体相関場プロジェクト」研究成果集より

考えられる。その電子スピンと核スピンの相互作用、すなわち量子ドット中の超微細結合を制御する研究を行った。以下に述べるように、超微細結合の制御は電子スピンと核スピン間の(スピン)情報交換に対する新しい概念を導き出すことができた。

自己形成量子ドット (SAD) の研究も行ったが、量子ドットの形成方法に特徴があり、量子ドットの応用や光との相互作用で重要であるが、本質的に今まで説明してきた量子ドットと違いがない。

1.3.1 縦型 2 重量子ドットのパウリ則に基づくスピントラップ

縦型量子ドットを使ってスピン 3 重項の励起状態から 1 重項の基底状態への緩和時間 T_1 (スピン格子緩和時間) を測定し、電子の波動としての緩和時間ナノ秒よりはるかに長い 200μ 秒を得た²³ (1.4.3)。量子情報処理の量子ドットの量子単位としてスピンが適していることを示した。さらに、弱結合の 2 重量子ドットにおいてパウリの排他則によって 1 電子電流が流れなくなるスピントラップ現象を観測した²⁴。図 14²⁵は縦型 2 重量子ドットの概略図である。動作の原理は以下の通りである (図 15²⁶参照)。

2 つの量子ドットの右側ドットを電子 1 個が専有し、そのスピンが上向きであるとする。負バイアスにすると右側の電極から電子が供給されるが、既に存在する電子が上向きスピンのため下向きスピンの電子のみが右側ドットに入る (図 15 の(a)、(c))。2 個の電子どちらかが左側へ転送され、最終的に左の電極へ出て行き、電流が流れる。一方正バイアスにすると、上向きスピンと下向きスピンのどちらも同じ確率で左のドットへ入る。下向きスピンの電子が入るときは、その電子は右のドットへ転送され、最終的に右の電極へ入って電流として観測される (図 15 の(b))。しかし、一旦右のドットに上向きスピンの電子が入ると、パウリの排他則により右のドットへ移ることができず (図 15 の(d)) 電流が流れないことになる。

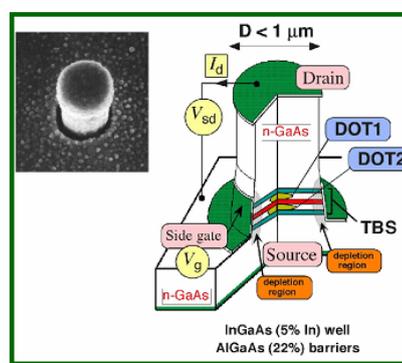


図 14 縦型 2 重量子ドット

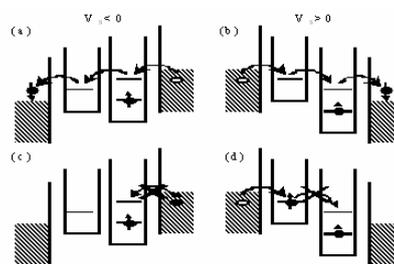


図 15 スピントラップの原理

²³ Fujisawa T, et al., *Nature*, 419, 278-281, 2002

²⁴ Ono K, et al., *Science*, 297, 1313-1317, 2002

²⁵ 図 14 : JST ホームページ「樽茶多体相関場プロジェクト」研究成果集より

²⁶ 図 15 : JST ホームページ「樽茶多体相関場プロジェクト」研究成果集より

実際に測定された電流に顕著な整流作用が認められた (図 16²⁷)。この成果は、1.4.2 項のゼーマン効果を使った方法とは異なる電子1個のスピンの向きを測定する有力な手段を提供しており、電子スピンを量子情報処理に使うとき、従来困難であった電子スピン1個の情報読み出しに使える1.4.2項とは別の異なる手段を提供した。最新の成果では微小磁石を使って「両方のスピン(上向きと下向き)を非破壊で読みだす」ことが可能になった²⁸。

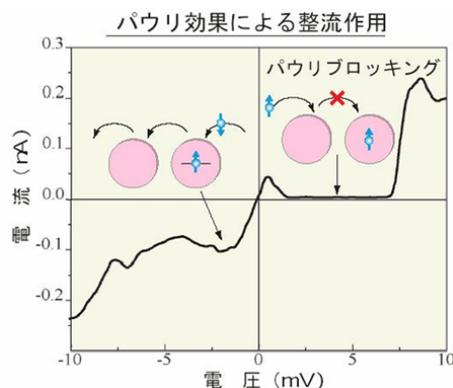


図 16 パウリ効果によるスピンのブロッケード

1.3.2 量子ドットの電子・スピンのダイナミクス

パウリ則によるスピンのブロッケード状態において、磁場によるトンネル電流の変化としてジャンプやヒステリシス、自発的な振動現象を示した²⁹。理論解析³⁰により、これらの不安定現象が電子スピンと核スピンの超微細結合によるものであることが分かった。図 17(a)³¹は2重ドットでの電子の移動と印加した磁場の模式図である。各ドットに1個ずつの電子がある場合、磁場により電子の3重項Tがゼーマン分裂を起こし(図 17(b)、1重項のエネルギーSと交差する付近で電子スピンと核スピンの相互作用が強く起こる。

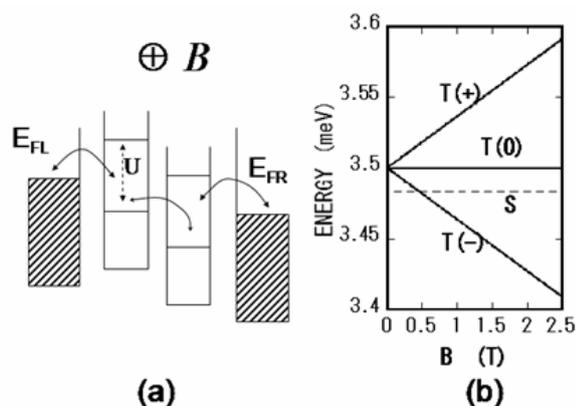


図 17 2重ドットの磁場の下での電子の移動とエネルギー準位の模式図。SとT(-)の交差する辺りで核スピンとの相互作用が強く起こる。

し、不安定現象が起こることが分かった。さらに、この理論解析から量子ドットの系を最適化すると、小さな磁場で100%に迫る核スピンの分極を実現することが可能である

²⁷ 図 16 : JST ホームページ「樽茶多体相関場プロジェクト」研究成果集より

²⁸ 最近、Phys.Rev.Lett.にアクセプトされた。

²⁹ Ono K, et al., Phys Rev Lett, 92, 256803, 2004

³⁰ Inoshita T, et al., J. Phys. Soc. Jpn., 72, Suppl A, 183-184, 2003

³¹ 図 17 : JST ホームページ「樽茶多体相関場プロジェクト」研究成果集より

ことが示された。

1.4 量子情報処理に関する新しい量子デバイス開発

量子輸送特性と量子情報処理に関する新しい量子デバイス開発に注力した。量子ドット中の単一電子のスピンを用いることは、量子計算の量子ビットを作成するのに最適な選択肢である。プロジェクトでは量子ドットを用いて、その中の電子スピンの量子ビット（キュービットとも言う **QUBIT**）の物理の探求と作成技術開発を行った。本報告書では、その後の展開に関係がある量子ドット中の電子の電子スピン共鳴（ESR）研究、単一電子スピンの読み出しデバイス開発を説明した。

1.4.1 導波管型 ESR 法を用いたデコヒーレンス³²時間 T2 解析

量子ドット中の電子のスピンを量子情報の単位とするために必要な技術として、1 電子スピンの回転を制御することが必要である。その基礎段階として、導波管型電子スピン共鳴（ESR）装置を開発し、半導体上の 2 次元電子ガスに適用した。ESR 信号（図 18³³）の半値幅からスピン緩和時間 T2 の下限値として 7 ナノ秒を得た。

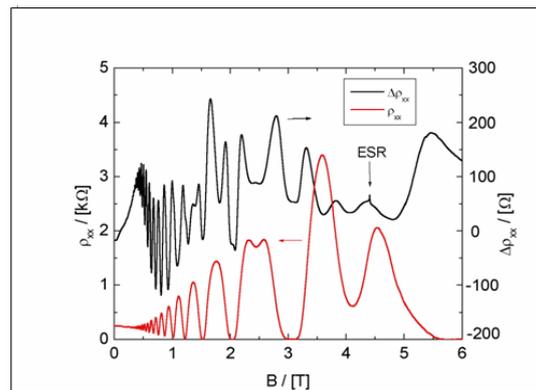


図 18 導波管型電子スピン共鳴の結果

1.4.2 量子ドット中の一電子スピンの読み出し

量子ドット中の個々の 1 電子スピンを読み出すデバイス作成を行い、その読み出しに成功した³⁴。スピンを量子とした量子情報処理においては不可欠の、1 電子スピンの読み出しに世界で初めて成功した。1 電子スピンはその磁気モーメントがあまりに小さく、よい検出手段がなかった。今回、「スピン・電荷変換」という方法により、スピンの情報を電荷の変化として読み出すことができた。原理は以下のとおりである。

³² 量子重ね合わせ状態のように、混合が起こっていない量子的な状態にある系が、系の外の世界と相互作用すると、しだいに量子性が薄れて、混合状態になってしまう。この系が次第に量子性を失っていく過程をデコヒーレンスと呼ぶ。

³³ 図 18：JST ホームページ「樽茶多体相関場プロジェクト」研究成果集より

³⁴ Elzerman JM, et al., *Nature*, 430, 431-435, 2004

量子ドットに大きな磁場を印加すると、ゼーマン分離が起こり、スピンの上向き、下向きによってエネルギーに差が生じる。量子ドットの電極に加える電圧を精密に制御するとスピン上向き、下向きの違いによって電子の位置を変えることができ、上向きのスピン (図 19³⁵) では電子がドットにトラップされ、下向きのスピンではすぐに逃げてしまい、ドットの近くに置いた電極に逃げるときの電流が観測される (図 20³⁶)。

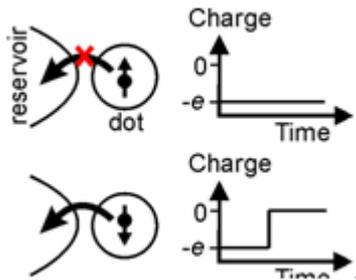


図 19 単一電子スピンの読み出し原理

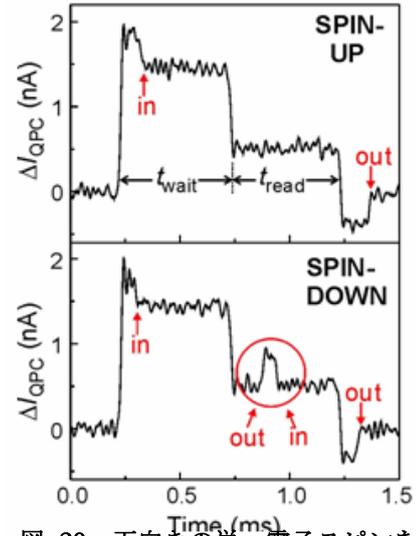


図 20 下向きの単一電子スピンを測定した電流

1.4.3 ゼーマン効果による長い緩和時間 T1 の作成

量子ドット中の 1 個の電子スピンについて、ゼーマン効果と特殊な電圧パルス、電流測定によって緩和時間 T1 を測定した³⁷。図 21a³⁸に示す電圧パルスを量子ドットに加えると、 t_l の時間で 1 重項 (基底状態) の電子が用意され、 t_h の時間で 3 重項 (励起状態) の電子が量子ドットへ入る。次の t_m の時間で緩和せずに残っている電子による電流を測定する。すなわち、3 重項の電子のスピンを反転しながら緩和する時間を測定することになる。図 21f³⁹は測定された

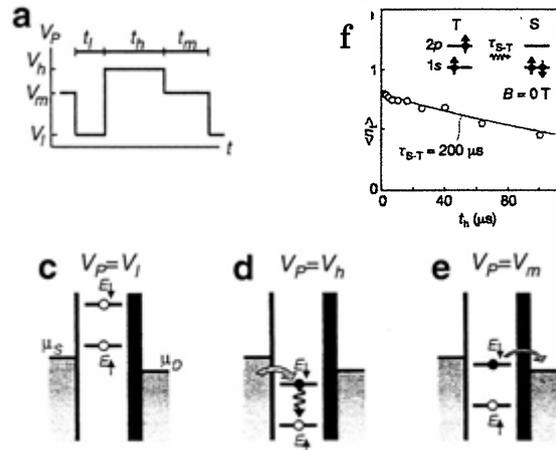


図 21 ゼーマン効果と特殊な電圧パルスによる 1 電子スピンの緩和時間測定

³⁵ 図 19 : JST ホームページ「樽茶多体相関場プロジェクト」研究成果集より

³⁶ 図 20 : JST ホームページ「樽茶多体相関場プロジェクト」研究成果集より

³⁷ Fujisawa T, et al., *Nature*, 419, 278-281, 2002

³⁸ 図 21 : JST ホームページ「樽茶多体相関場プロジェクト」研究成果集より

³⁹ 図 21f : 脚注 36 より (Fujisawa T, et al., *Nature*, 419, 278-281, 2002)

緩和時間を示し、200 マイクロ秒を得た。この値はスピンの変化を伴わない緩和時間に比べて 5 桁も長い時間である。最近の理論ではデコヒーレンス時間 T_2 はほぼ T_1 、すなわち 200 マイクロ秒となる。200 マイクロ秒のデコヒーレンス時間は量子ゲートを動作させるのに十分な長い時間である。

第2章 プロジェクト終了から現在に至る状況

プロジェクト終了後、総括責任者によって（独）科学技術振興事業団（以後JSTと略称する）の戦略的創造研究推進事業発展研究（SORST）（課題名：人工原子・分子の量子スピン情報）と続いて国際共同研究（ICORP）（課題名：量子スピン情報）に研究が展開した。

これらのプロジェクトではプロジェクトの成果の中、量子情報処理関連のテーマに重点をおいた研究を実施し、量子情報処理のための量子ドットデバイスの実現に向けて大きな進展を見た。

電子の多体相関を対象にした基礎的な研究については、近藤効果と量子細線の研究において発展があった。

2.1 量子情報処理デバイスのための量子ドット制御

量子情報処理を実現するには大きく六つの要請がある。スピンによる量子情報では以下のように記述できる。

- (1) スピン量子 1 個を自由に制御する。
- (2) スピン量子 2 個を操作できること。すなわち量子演算が行えること。
- (3) スピン量子の情報 1 個の状態を読み出せること。すなわち、スピンの上向き、下向きを判定できる。
- (4) スピン量子のコヒーレンス時間が十分長いこと。
- (5) スケーラビリティ。すなわち、量子ビットを自由に増やせること。
- (6) 量子状態を初期化できること。

これらの要請の中で(6)項（初期化）は容易であり、一般的に研究の対象になっていない。また、(3)項のスピンの読み出し技術はプロジェクトによって開発済みである。量子ドットを量子情報デバイスとして実現する要請に従って、次項以下その研究成果と発展をまとめた。

2.1.1 単一電子のスピン制御

量子情報処理を実現するためには(1)量子ビット 1 個のもつれ状態を自由に制御することが必要である。

プロジェクトで 200 マイクロ秒に達する電子スピンの長い緩和時間が測定されてお

り、スピンを量子ビットに選ぶことがコヒーレンス時間の観点から有利である。電子スピンを量子ビットとする場合、スピンの上向き、下向きがもつれ合った状態、すなわちスピンが上下軸から傾いた状態を自由に作り出すことが必要である。スピンの方向を制御することは既に核磁気共鳴の分野で広く行われている。その原理を電子に適用した技術は電子スピン共鳴 (ESR と呼ぶ) として、不対電子の状態を知る分析装置として広く使われている。しかし、量子ドットに対して適用するには、サイズや発熱等の問題で困難であった。この課題に対して、傾斜磁場の方式を開発し^{40,41}、半導体量子ビットの制御技術としての基礎を築いた。

原理は以下の通りである。図 22(b)⁴²において、外部磁場と強磁性体 M によって作られる磁場は、図 22(c)に示すように左右の量子ドットに対して x 方向に方向も大きさも異なる傾斜磁場を作る。その磁場と電極に加えた交流電界により ESR を実現した。交流電界の周波数を ESR の起こる周波数とし、その電界の強度と印加時間によって電子スピンを任意の角度まで (最大 π) 傾けることができる。量子ドット毎に傾斜磁場の大きさを変えておけば、共鳴周波数が異なるので、加える交流電界の周波数を変えれば目的とする量子ビットの電子スピンのみを選択的に制御することができる。実際にこの方式によるモデルデバイスでの実証実験を経て⁴³、実際に連続的な高周波電圧を電極に印加して電子スピン共鳴による電子のスピン制御とその結果の読み出しを実現した⁴⁴。図 22(d)は読み出しの模式図である。この成果によって量子ドット中の 1 個の電子スピンのスピン制御 (スピンを任意の角度へ回転すること) を実現する道筋を示した。その後、世界で初めて 1 電子スピンの任意回転制御に成功した⁴⁵。

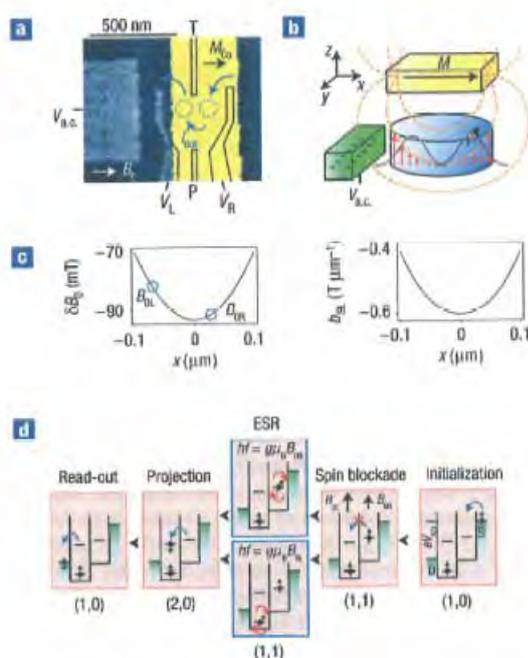


図 22 半導体量子ドット上の傾斜磁場

⁴⁰ Tokura Y, et al., *Phys Rev Lett*, 96, 047202, 2006

⁴¹ Pioro-Ladriere M, et al., *Appl Phys Lett*, 90, 024105, 2007

⁴² 図 22 : Pioro-Landriere, M. et al, *Nature Phys*, 4, 776-779, 2008

⁴³ Pioro-Ladriere M, et al, *Physica E*, 40, 347-350, 2007

⁴⁴ Pioro-Landriere, M. et al, *Nature Phys*, 4, 776-779, 2008

⁴⁵ 投稿中。

2.1.2 結合量子ドットの電子状態制御

量子情報処理には二つ以上の量子における演算ができなければならない。そのために、二つの量子ドットの相互作用の研究を詳細に行った。

プロジェクトで開発した、縦型量子ドットの横結合形の2重量子ドット（人工分子構造）で生じる、ドット間に働く相互作用（クーロン相互作用やトンネル結合、スピン交換相互作用など）を詳しく調べた。

並列結合型の2重量子ドットでは二つのドットの電子数をクーロンブロックードにより自由に制御できる。それぞれの量子ドットの電子数を変化させる時に生じるクーロン反発力とトンネル反発力によって生じるアンチクロッシングの領域の存在はプロジェクトで研究

で行われた。さらにその現象を解析すると、図24⁴⁶に示すように、矢印の方向へゲート電圧を変化させると1つのドットに電子が局在した領域から両方のドットに電子が広がって非局在した状態を経由して、

もう一つのドットに電子が局在する状態へ変化することが分かった⁴⁷。2個の電子はそれぞれのドットに分かれて存在しているが、電子のスピン交換相互作用と呼ばれる量子力学的結合を保っている。この「電子は分かれて存在しているが、量子力学的結合を保っている状態」（「ハイトラー-ロンドン状態」）（図25⁴⁸）を

実現することによって、二つのドットのスピンは量子もつれ状態になり、量子計算に必要な量子ビットの制御を可能にできる。量子演算の必須要素となる二つの量子状態の制御NOT演算が可能であることが示された。さらに最近ではその先の2量子ビット操作、

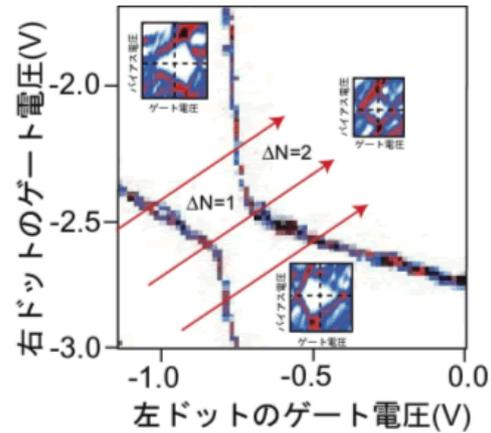


図24 2重量子ドットのアンチクロッシング領域における電子数の変化とその制御。

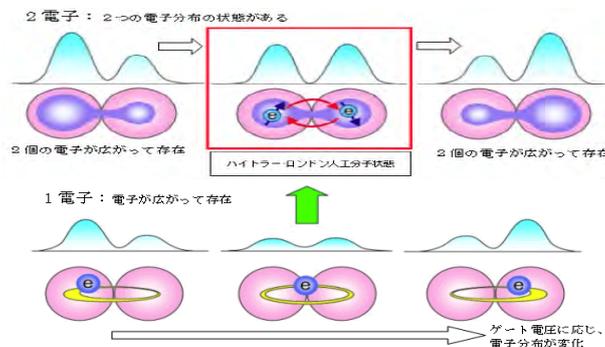


図25 二つの量子ドットの電子状態を模式的に示した。2電子では各ドットに1個ずつ配置され、かつ、スピンの結合は保たれ、もつれ状態にある。

⁴⁶ 図24：科学技術振興機構報 183号より

⁴⁷ Hatano T, et al., *Science*, 309, 268-271, 2005

⁴⁸ 図25：科学技術振興機構報 183号より

SWAP 操作にも成功した⁴⁹。量子ドットによる量子演算としては世界初である。

2.1.3 核スピン検出と制御

電子スピンのコヒーレンス時間は、半導体を組成する GaAs 結晶の Ga と As の原子核スピンの時間的にゆらぎ、そのために発生する結晶内の磁場ゆらぎに大きく影響されている。核スピンを制御することは電子スピンを量子ビットとして使う量子情報処理においては重要な技術である。

スピントロニクスの下、核スピンによって状態が大きく影響を受けることがプロジェクトで見いだされた。さらに、その結果から核スピンの偏極を実現できる可能性もプロジェクトで示された。

プロジェクトで観測したスピントロニクス状態下のリーク電流に現れる核スピン効果についてさらに詳しく調べた結果、核スピン揺らぎ磁場と電子スピン間相互作用との大小により、核スピンの揺らぎが現れる領域と核スピンの分極する領域があることを見出した⁵⁰。

また、スピントロニクスの状態で電子スピン間の交換エネルギーを磁場と素子のソース・ドレイン電圧で制御できることを利用し、磁場を一定にしつつ核スピンポンピングを制御する電場印加シーケンスを工夫することで、核スピン分極に由来する Overhauser⁵¹磁場を測定し (図 23⁵²)、核スピン分極の値を約 60%と見積もり、さらに核スピン 100%分極法も提案した⁵³。

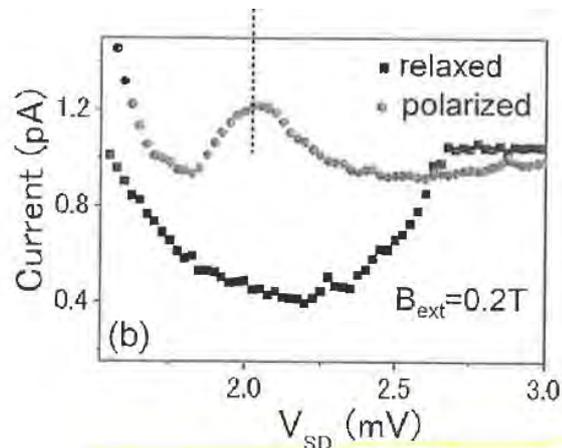


図 23 核スピンが分極後のリーク電流 (polarized)。分極の効果によって、大きな磁場を掛けた時と同じリーク電流を観測した。

⁴⁹ 論文執筆中。

⁵⁰ Hanson R, et al, *Rev Mod Phys*, 79, 1217-1265, 2007

⁵¹ Overhauser 磁場: 電子スピンと核スピン間の超微細相互作用によって生じる核スピンの分極磁場。

⁵² 図 23 : Baugh J, et al, *Phys Rev Lett*, 99, 096804, 2007

⁵³ Baugh J, et al, *Phys Rev Lett*, 99, 096804, 2007

2.1.4 量子ドットのスケラビリティ

半導体量子ドットを3個以上並べたスケラビリティの研究行われた。

三角格子状や一列に並ぶ縦型3重量子ドットの作製技術が確立し、さらにその電気的特性を調べた。三角格子の量子ドットのクーロン振動状態を観測し、電極電圧の制御により各ドットに電子を安定に配置できることを確認した(図26⁵⁴)⁵⁵。量子情報処理におけるスケラビリティは様々な方式に共通の課題であり、スケラビリティを実現した方式は存在しない。

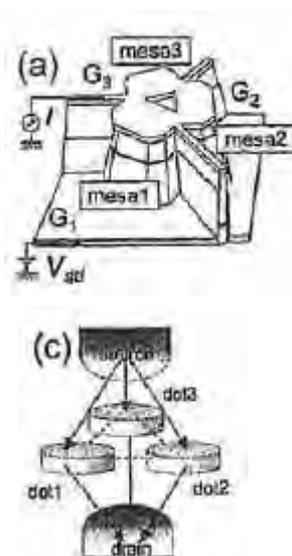


図 26 3重量子ドット

2.1.5 まとめ

量子情報処理実現ための要請に従い、プロジェクトおよびその発展研究の成果を要約した。量子スピンを自由に制御する(1)項は傾斜磁場の手法を ICORP で開発した。その原理の有効性を確認した。さらに任意の回転制御が最近実現した。量子スピンの演算の(2)項は2個の縦型半導体量子ドットにそれぞれ1個ずつ電子が入り、そのスピンに量子もつれが存在することを確認した。最近、量子演算のスワップ実験に成功した。スピン情報の読み出しの(3)項は既にプロジェクトにおいて、ゼーマン効果を使った方法によって1電子のスピンを読み出すことに世界で初めて成功した(デルフト大学による成果)。その後、やはりプロジェクトの成果であるスピンプロセドを使った方法により、実際に使いやすい1電子のスピンを読み出し手段を実現した。最新の成果として微小磁石を使って「両方のスピン(上向きと下向き)を非破壊で読み出す」ことが可能になった。コヒーレンス時間の(4)項では、核スピンとの相互作用によるコヒーレンスの消失(デコヒーレンスと呼ぶ)を確認した。核スピンの方向を揃え、電子スピンへの影響を最小にする制御方法の研究に進展があった。(5)項のスケラビリティでは、多数の量子ビットまで拡大するためには、3個での量子ビットをどのように配置し、どのような問題があるかを明確にする研究が進行中である。量子ビット配列の道筋を付けることが課題である。以上の通り、本研究プロジェクトで得た成果が具体的に半導体量子ドットによる量子情報処理デバイスの実現へと着実に発展している。

⁵⁴ 図 26 : Amaha S, et al, *Appl Phys Lett*, 94, 092103, 2009

⁵⁵ Amaha S, et al, *Appl Phys Lett*, 94, 092103, 2009

2.2 量子ドット結合系の電子相関と量子コヒーレンス

プロジェクトの成果を基に、電子の強相関現象の研究を展開した。

2.2.1 量子細線結合系の電子相関

プロジェクトで半導体量子細線において、負のドラッグ、すなわち、平行する細線の片方に電流を流したとき逆方向の電流が流れることを観測したが、その現象の解明ができた⁵⁶。負のドラッグは印加する磁場が強く、流れる電子が少ないときに起こる。図 27⁵⁷に示すように、ドライブ細線の電子が移動するとドラッグ細線の電極に正の電荷（ホール）が生じ、その正の電荷に向かって逆向きの電流が流れる。また、この現象からドラッグ細線の電子はウィグナー結晶⁵⁸の状態であることを示すことに成功した。固体中でのウィグナー結晶の実現は、それ自体困難であるばかりか、例え実現できたとしても検証することが難しい課題として長い間多くの研究者の挑戦を跳ね返してきた。本研究では、電子間の相互作用が強く働く一次元電子系の量子細線を用い、「ウィグナー結晶中の電子は外部の電界に対してミクロに配置を変えることができない」という最も基本的かつ重要な性質に着目して、電気抵抗の大きさではなく、電気伝導の向きの違いという明らかな特徴を捉えることによって結晶状態の検出に成功した。

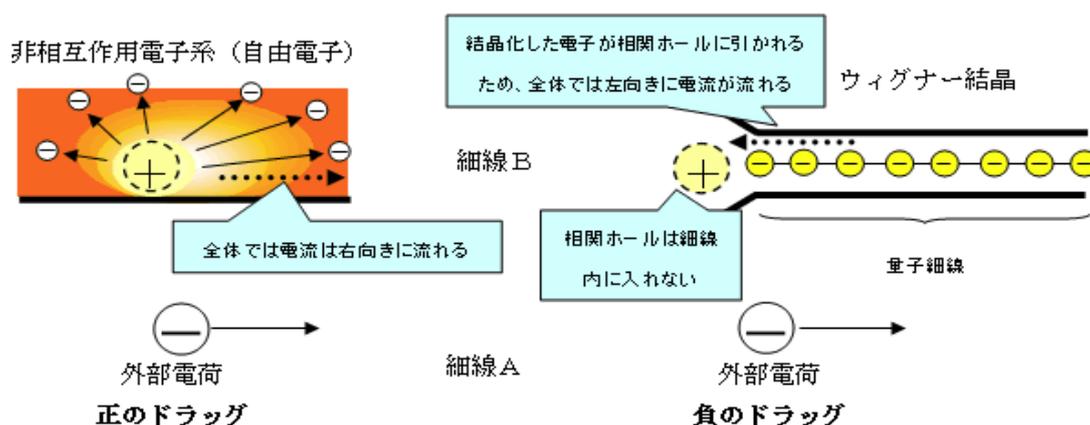


図 27 量子細線の負のドラッグ

⁵⁶ Yamamoto M, et al, *Science*, 313, 204-207, 2006

⁵⁷ 図 27：科学技術振興機構報 312 号より

⁵⁸ ウィグナー結晶：電子ガスにおいて、非常に低密度な領域では、電子はお互いクーロン斥力を及ぼし合っているにもかかわらず結晶化することが予想されている。この結晶をウィグナー結晶という。

2.3 プロジェクトメンバーの活動状況

プロジェクトの研究者の一部（羽田野剛司、天羽真一、寺岡総一郎、太田剛（NTT物性科学基礎研物量グループ兼任））は、SORST、ICORP の研究者として継続した。泉田渉は東北大学大学院理学研究科の助教、山田和正は九州大学大学院理学府物理学専攻の助教へとキャリアアップした。その他の研究者も他の研究所、JST 等へキャリアアップした。プロジェクトの研究者として外国人研究者が活躍した。Michael Stopa は Center for Nanoscale Systems, Harvard University に研究者として職を得た。

プロジェクトはオランダのデルフト大学との共同研究であった。さらに ICORP では同じくデルフト大学にスイスのバーゼル大学が加わり国際的な共同研究で進められた。特にデルフト大学との関係は深く、研究者の交流が盛んである。また、優れた研究成果と国際的な研究体制のために、海外からの研究者が多数研究へ参加して実績を挙げている。研究の国際化が実現されており、結果として日本の科学技術を世界にアピールしている。このような研究環境で育った日本の研究者に多くのよい影響を与えるであろう。

第3章 プロジェクト成果の波及と展望

3.1 科学技術への波及と展望

3.1.1 量子情報処理デバイスの実現

ノイマン型の現在のコンピュータの限界を超える夢の計算機として量子情報処理という概念が作り出された当時⁵⁹は本当に実現の可能性を信じる人は少なかった。しかし、量子情報処理によって現在の通信の秘匿技術である素因数分解が容易に計算できるアルゴリズムが発表された⁶⁰後、実際に量子情報処理の効果が広く認識され、急速に研究が発展してきた。

研究は大きく二つの領域で行われている。ひとつは量子情報処理のアルゴリズムの研究である。前述の素因数分解アルゴリズム以外に検索アルゴリズムや誤り訂正のアルゴリズム等が作られてきたが、現在までそれら少数のアルゴリズムに留まっている。実用化のためにはアルゴリズムの開発も重要な課題である。もうひとつの研究領域は実際の量子情報処理を行うハードウェアの研究である。すなわち、量子を制御し、アルゴリズムが要求する処理を行うためのハードウェアを実現する研究である。ハードウェアの研究には様々な量子を使った試みが行われており、極低温のイオンから溶液の核スピン共鳴など多彩な試みがなされている。実際の量子情報処理を実現した実験では7個の量子ビットで数15の素因数分解が正しくできたことが報告されている⁶¹。これらの試みの延長で展開を図るには大掛かりなためは実用化が難しく、小さくて扱いやすい固体の量子情報処理デバイスが求められている。

固体量子デバイスとして、世界的に研究が行われていて有望とされているのは、超伝導量子ビットと半導体量子ビットの二つの方式である。超伝導量子ビットデバイスはジョセフソン量子ビットを使う方式で、理化学研究所等世界で開発が進められている。量子ドットほど結合のパラメータを自由に変えられないが、構造が簡単でスケラビリティに優れている。2003年に2量子ビットの制御NOT演算の成功を発表しているが、コヒーレンス時間が短いのが課題である。

一方、半導体量子ドットが超伝導量子ビットと並んで固体の量子情報処理デバイスの有力な候補に躍り出たのは、プロジェクトとその後の展開によって次々と新しい技術が開発されてきたからである。半導体量子ドットの電子スピンによる量子情報処理の基本

⁵⁹ 量子情報処理は、1985年にオックスフォード大学教授デビッド・ドイチュによって基本的な理論が提唱された。

⁶⁰ 量子情報処理による素数の因数分解アルゴリズムは1994年にShorによって開発された。

⁶¹ IBMのアルデマン研究所。2001年。

技術である①量子状態の読み出し（スピントロニクス）②1量子状態の制御（傾斜磁場による ESR）③二つの量子ビットによる NOT 演算あるいは XOR 演算（人工分子状態の制御）が開発された新技術である。さらに、電子スピンの量子情報が失われるデコヒーレンスに大きな影響を与える核スピンの影響も本研究で明らかになってきた。確かに、量子情報処理の基本技術が実現するアイデアが出揃い、その実証にも成功しつつある。現段階は量子情報処理デバイスの要素技術を確認しつつある段階と言えよう。

今後、この成果をさらに発展させ要素技術を確認するとともに、量子ビットの多数配置が可能な基本量子ビットのユニットを実現する必要がある。これらの課題については 2010 年度の「先端研究助成基金」で行われる予定である。

量子情報処理のために開発した量子ドット操作技術は非常に独創的である。後述のように、本研究の成果である論文の被引用回数が非常に多く、また、現在も引き続き安定して引用され続けている。プロジェクトで開発した技術は 1 電子を操作する技術であり、本質的に非常に小さなエネルギーを扱っている。例えば 1 電子スピンの読み出しは非常に小さなエネルギーを測定する技術として使える可能性がある。

未だに量子情報処理のハードウェアの研究は活発に行われており、どの技術が本命であるかを定めることはできない。すべての方式に共通して必要なものは量子力学を深く理解し、それを応用しようとする努力である。現在、量子力学を疑う人はなく、原子、分子や固体の物理の原理として確立している。原理的に確立した後に、様々な応用が花開くことは科学技術の歴史が教えており、量子情報処理を目標になされている量子応用技術開発の努力は、思いもよらない応用の副産物を生み出すと思われる。21 世紀に大きく進展する分野や技術として、生命科学、再生医療等が期待されているが、量子力学の応用技術もその一つであろう。

3.1.2 電子強相関系の物理

半導体量子ドットの近藤効果と半導体量子細線の研究は電子の多体強相関現象というキーワードで括ることができる。「近藤効果」が単に希薄磁性合金の効果に留まらず、一般の多体問題に共通する最も基本的な性質であることが明らかにされ、物性物理のみならず素粒子物理にまで大きなインパクトを与えたことは有名である（グルーオンによるクォークの閉じ込めが近藤効果と同種な現象である）。物性物理では、希土類合金やアクチナイド合金のなかには電子の有効質量が自由電子の 100-2000 倍もある重い電子系と呼ばれる一連の物質がある。これらの物質は高濃度（高密度）近藤系、あるいは近藤格子系とも呼ばれ近藤効果の物理と密接な関連があると考えられている。また、銅酸化物高温超伝導体等の遷移金属強相関電子系はこれまで、近藤効果と無縁と考えられていたようである。しかし、最近の研究によると遷移金属強相関電子系も近藤格子とし

ての理論展開が有力であると理解され始めている。このように、近藤効果は多体強相関現象の代表として様々な分野で研究が行われている。プロジェクトおよびその発展研究が高温超伝導にすぐ結びつくわけではないが、同じカテゴリーの研究として何らかの貢献が期待できる可能性がある。

量子細線の研究も純粋に基礎的研究と応用研究が行われてきた。応用研究としては量子細線レーザーや光学への応用が広く行われてきた。最近、量子細線を量子情報処理の量子ビットの移動に使うというアイデアが出てきた。しかし、プロジェクトの研究は純粋が基礎研究であり、応用としての展望は困難である。一方、本研究の手法である、人工的な0次元、1次元の実験系を半導体上に作成し、様々なパラメータを変化させて、現象を追及する研究手法は大変優れており、固体中の現象を研究する有力な手段である。そもそも半導体量子ドットに人工原子を作り、その人工原子中の電子の状態を研究したことが本研究の原点である。研究の経過を眺めると半導体量子ドットを場とした物理が花開いている。人工原子や人工細線は固体中の量子力学を研究するには最適であり、固体中の現象の理解が格段に進むと考えられる。0次元、1次元という単純な系であるからこそ理論的に扱うことが容易であり、またプロジェクトで培った実験技術による検証の両輪によって、今後も学問的な成果が期待できるであろう。

3.1.3 プロジェクトの論文から見たインパクト

(1) 論文数からのインパクト状況

プロジェクトの開始以来ほぼ10年が経過している。これまでの論文の中から被引用数100件を越える論文10報（レビューを除いた）を取り上げ、被引用数の推移をまとめた（図28）。

取り上げた論文すべてについて、09年度を除いて年間14件～115件まで定期的に引用されており、これらの論文が量子ドットあるいは人工原子、人工分子の物理において先駆的で、基礎となる成果を挙げたことの証拠である。10報の合計引用件数は、2008年440件、累積引用件数は2400件と非常に多く引用されている。特にNo.1の1電子スピンの読み出しの論文は、2008年1年で115件、累計450件以上に達している。

注目されている論文は、1電子スピンの読み出し技術、量子ドットでの近藤効果、人工分子（2重量子ドット）の先駆的論文、そして、スピンドロケードの下での電子スピンと核スピンの相互作用等であった。いずれも独創的で、先駆的な成果であることを裏付けている。

被引用件数の多い論文を取り上げたので、最近の論文はこの統計に入っていない。2008年以降の論文では下記の「傾斜磁場によるESR」関係の論文が被引用件数10件

と多く、注目の研究であることが分かる。

Pioro-Ladriere M, et al., “Electrically driven single-electron spin resonance in a slanting Zeeman field”, Nature Phys, 4, 776-779, 2008

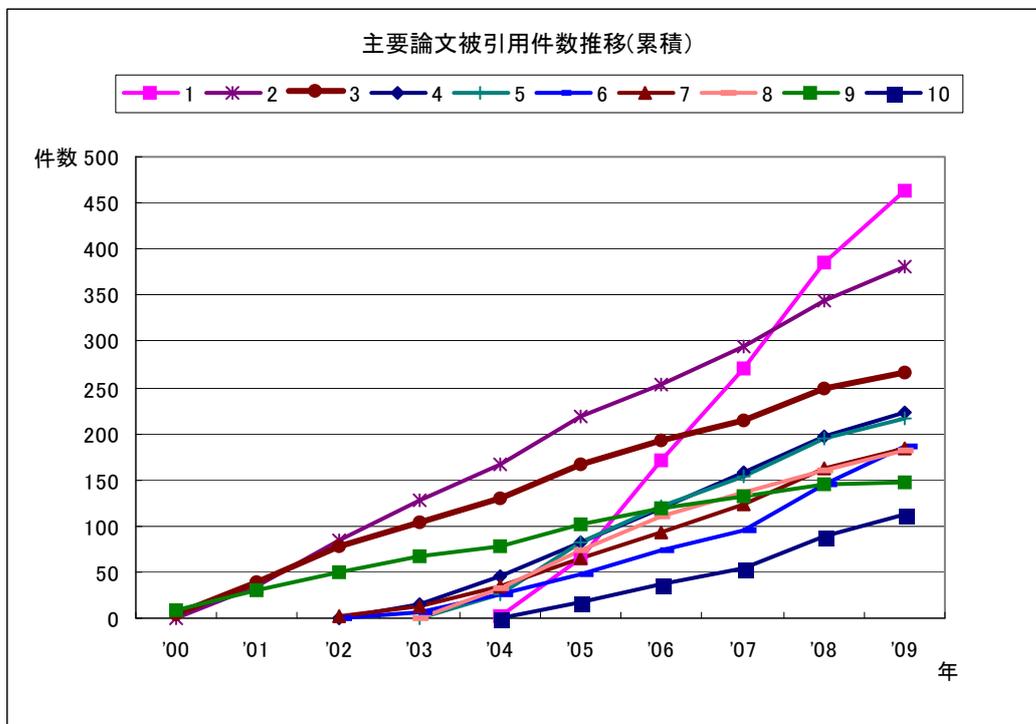
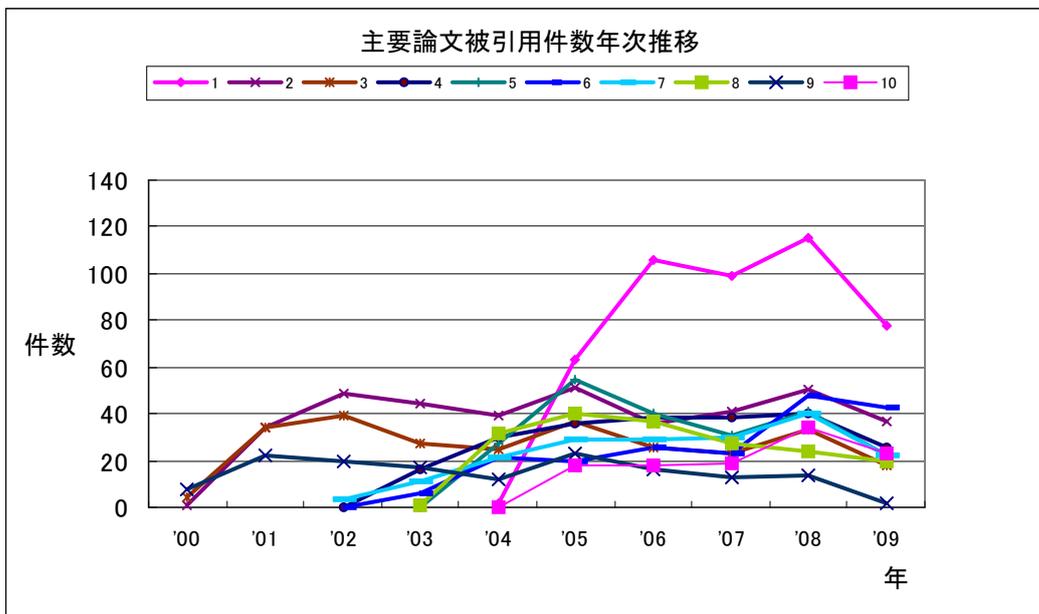


図 28 主要論文 10 報の被引用件数年次推移と累積

No.	書誌事項	出版年	2008年引用件数	被引用件数
1	<u>Elzerman JM, Hanson R, van Beveren LHW, Witkamp B, Vandersypen LMK, Kouwenhoven LP</u> Single-shot read-out of an individual electron spin in a quantum dot Nature, 430, 431-435, 2004	2004	115	463
2	<u>van der Wiel WG, De Franceschi S, Fujisawa T, Elzerman JM, Tarucha S, Kouwenhoven LP</u> The Kondo effect in the unitary limit Science, 289, 2105-2108, 2000	2000	50	382
3	<u>Sasaki S, De Franceschi S, Elzerman JM, van der Wiel WG, Eto M, Tarucha S, Kouwenhoven LP</u> Kondo effect in an integer-spin quantum dot Nature 405, 764-767, 2000	2000	33	266
4	<u>Fujisawa T, Austing DG, Tokura Y, Hirayama Y, Tarucha S</u> Allowed and forbidden transitions in artificial hydrogen and helium atoms Nature, 419, 278-281, 2002	2002	40	224
5	<u>Hanson R, Witkamp B, Vandersypen LMK, van Beveren LHW, Elzerman JM, Kouwenhoven LP</u> Zeeman energy and spin relaxation in a one-electron quantum dot Phys Rev Lett, 91, 196802, 2003	2003	41	216
6	<u>Ono K, Austing DG, Tokura Y, Tarucha S</u> Current rectification by Pauli exclusion in a weakly coupled double quantum dot system Science, 297, 1313-1317, 2002	2002	48	187
7	<u>Cronenwett SM, Lynch HJ, Gokdhaber-Gordon D, Kouwenhoven LP, Marcus CM, Hirose K, Wingreen NS, Umansky V</u> Low-temperature fate of the 0.7 structure in a point contact: A Kondo-like correlated state in an open system Phys Rev Lett, 88, 226805, 2002	2002	40	185
8	<u>Elzerman JM, Hanson R, Greidanus JS, van Beveren LHW, De Franceschi S, Vandersypen LMK, Tarucha S, Kouwenhoven LP</u> Few-electron quantum dot circuit with integrated charge read out Phys Rev B, 67, 161308, 2003	2003	24	181
9	<u>Tarucha S, Austing DG, Tokura Y, van der Wiel WG, Kouwenhoven LP</u> Direct coulomb and exchange interaction in artificial atoms Phys Rev Lett, 84, 2485-2488, 2000	2000	14	147
10	<u>Ono K, Tarucha S</u> Nuclear-spin-induced oscillatory current in spin-blockaded quantum dots Phys Rev Lett, 92, 256803, 2004	2004	34	112

(2) キーワードによるインパクト状況の調査

プロジェクトを代表する特徴的なキーワードを選び、キーワード検索を行ってプロジェクトの影響を調べた。

量子ドットにおけるスピンプロックードはプロジェクトの重要な研究課題であり、その後の展開においても大きな成果を挙げた。キーワードからこの点を調べた。

キーワードとして

① "Quantum dot + Artificial atom + Artificial molecule"

② "Spin and (Block or Blockade or Pauli exclusion principal or Pauli exclusion) "

を選び、量子ドットにおけるスピントラップを表す①and③で検索した (図 29)。

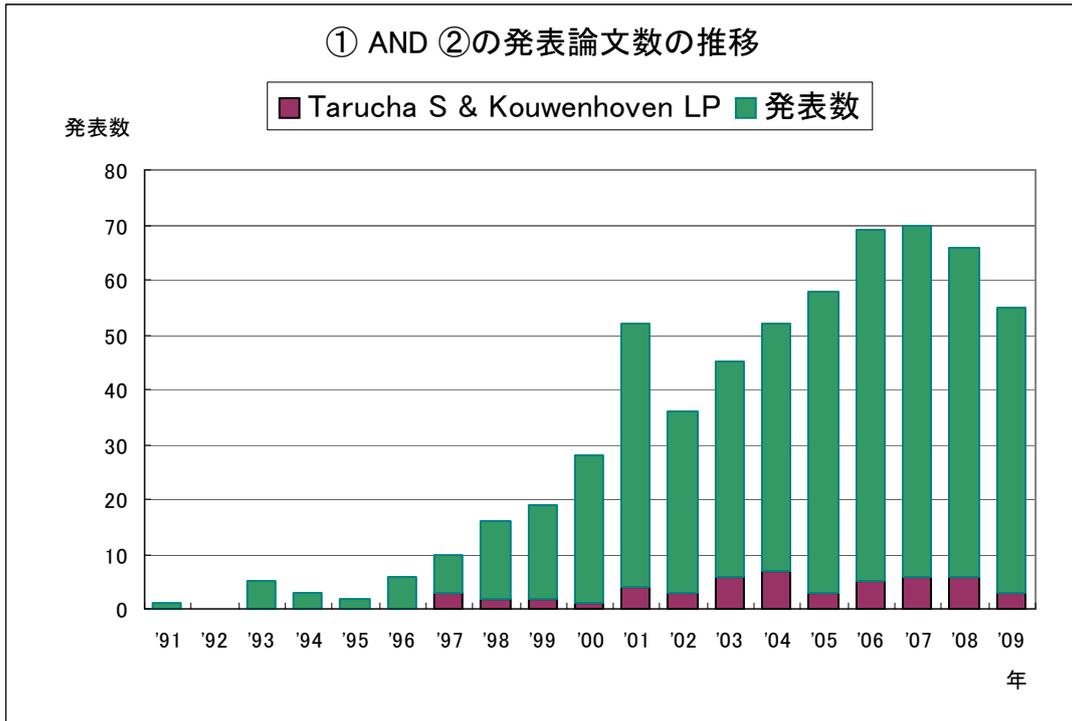


図 29 「量子ドットにおけるスピントラップ」論文数の推移

この図から総括責任者あるいは共同研究相手のデルフト大学が研究を量子ドットにおけるスピントラップの研究論文が出始めた頃から論文数が顕著に増大している。全体の論文数に対する比率は大きくないが、本研究課題を推進してきたグループであることを伺わせる。

また、「量子ドットにおけるスピン読み出し」もプロジェクトにおける重要な成果であった。このインパクトを調べるために次のキーワードを追加した。

③ “(Spin or single spin) and (Read or Read-out or readout or read out) ”

前述の量子ドット関連のキーワード①and③で検索すると図 30 の結果が得られた。

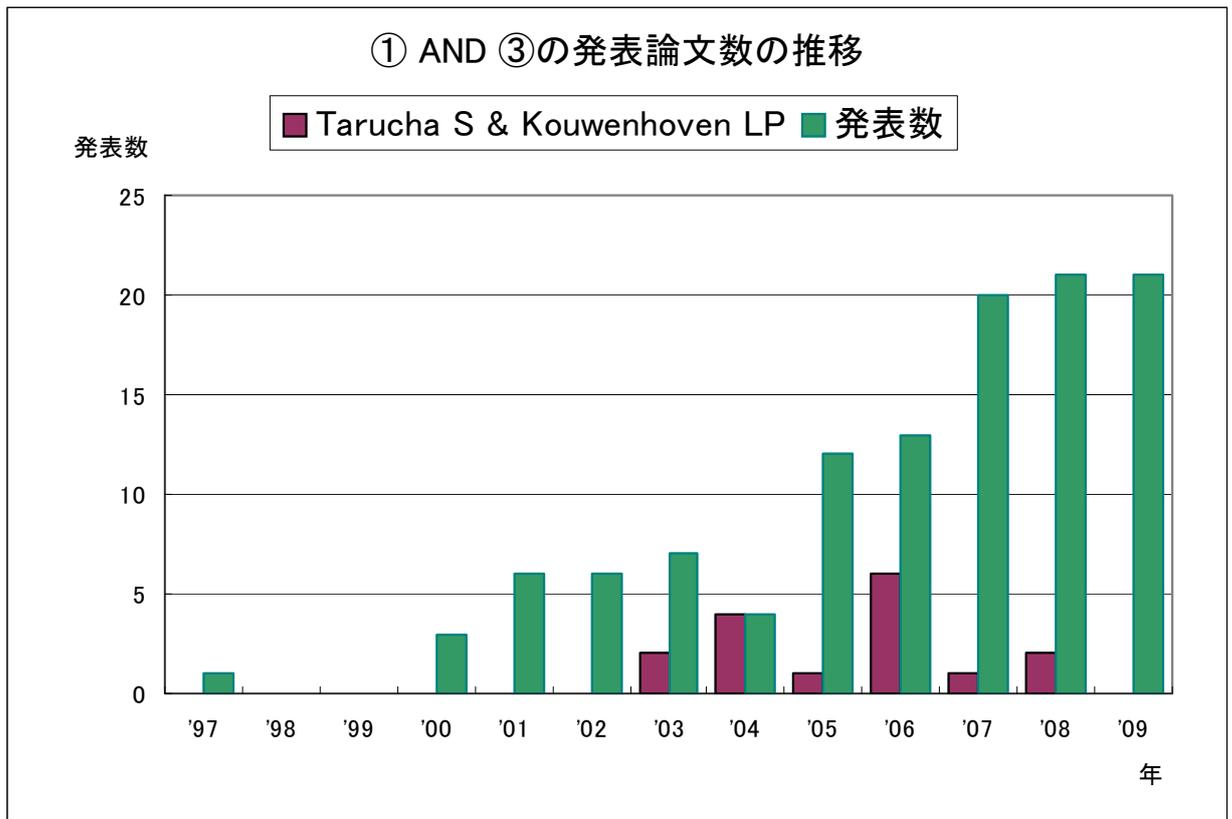


図 30 「量子ドットにおけるスピン読み出し」論文数の推移

プロジェクト以外の論文数が 2004 年まで 7 件以下であったが、2005 年から一挙に 12 件になり、その後 2008 年、2009 年は 21 件まで増加している。最近のプロジェクトの論文発表が減っているにもかかわらず、それ以外の発表数が増加している。プロジェクトの成果によるインパクトが大きかったと考えられる。

このことは③の「スピンの読み出し」というキーワードの全件数 2600 件に対して、引用文献番号 1 の文献 (Nature, 430, 431-435, 2004) が被引用件数、469 件で第 2 位、引用文献番号 8 の文献 (Phys Rev B, 67, 161308, 2003) が 185 件で第 9 位の被引用件数であったことから裏付けられた。

強相関電子物理を追究したプロジェクトの代表的な例として「量子ドットにおける近藤効果」の研究成果インパクトをキーワードから調べた。④”Kondo Effect”キーワードを使用し、①の量子ドットキーワードとの and を検索した結果を図 31 に示した。

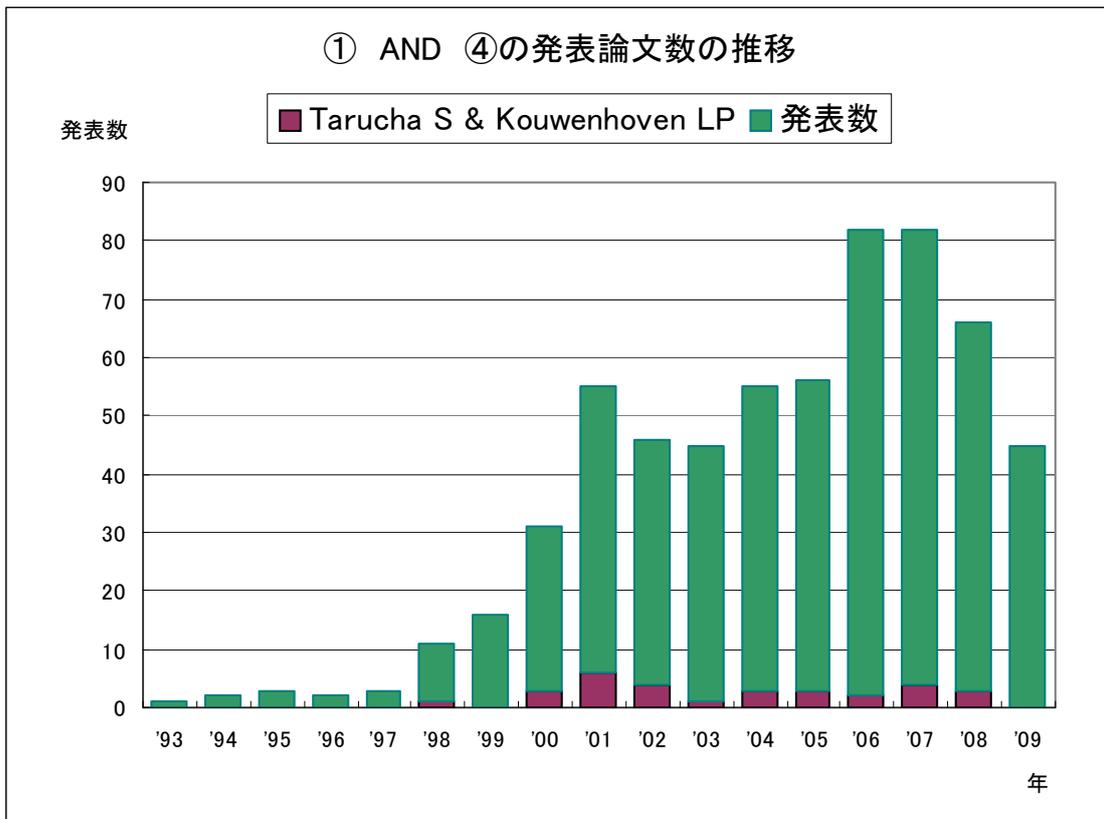


図 31 「量子ドットにおける近藤効果」論文数の推移

図からプロジェクトの開始頃から「量子ドットの近藤効果」研究が盛んになっていったことが分かる。一概にプロジェクトの成果により論文数が増えたということはこのグラフからは言えないが、④「Kondo effect」のキーワードの文献約 2100 件に対して、Science 281, 540-544, 1998 (ERATO プロジェクト以前の文献) の被引用件数が 788 件で第 3 位、被引用文献番号 2 の文献 (Science 289, 2105-2108, 2000) が被引用件数 387 件で第 8 位となっていることからインパクトが大きかったことが裏付けられた。

3.2 社会経済への波及と展望

3.2.1 量子情報社会への展望

量子コンピュータは既に様々な本が出版されている⁶²。以下はそれらの情報にあわせて数名の専門家から聴取して得た情報をまとめたものである。

実現が期待されている技術、あるいは製品を以下に時間順に説明した。その実現時期の一例を図 32⁶³に示した。

(1) 量子暗号通信（近距離）

近距離（約 100km 以内）の量子暗号通信による暗号鍵の通信技術は殆ど実用域に入っているとされており、実際の社会的なニーズの立ち上がりを待っている。企業や官庁などの敷地内の完全秘匿通信が予想される応用である。

(2) 遠距離の量子暗号通信

国内だけでなく、国外に範囲を広げた量子暗号通信は量子中継という技術が必要であり、そのためには小規模の量子情報処理デバイスが必要である。実現にはまだ時間が掛かると考えられている。

(3) 量子シミュレーション

量子状態を量子デバイスでシミュレーションする。

(4) 量子コンピュータ

多数（数百以上）の量子ビットを駆使したコンピュータ。最も期待される計算は、現在のコンピュータでは実用的な時間で解が得られない、NP 完全問題⁶⁴を含む最適化問題の計算である。

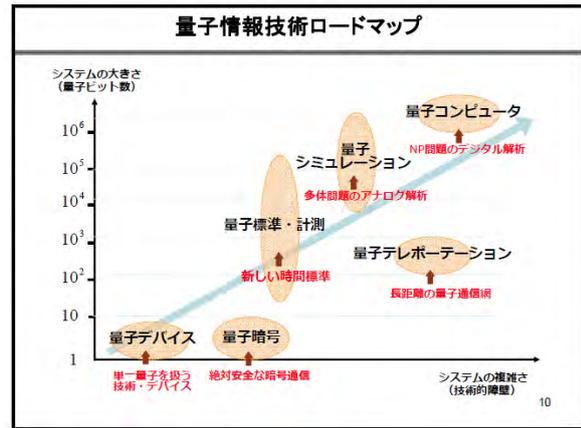


図 32 量子情報技術のロードマップ

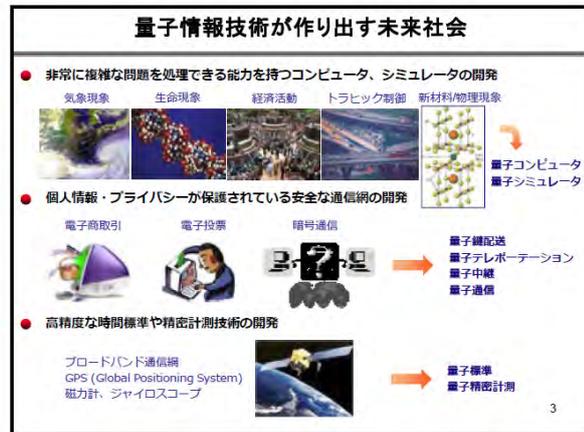


図 33 量子情報社会が作り出す未来社会

⁶² 例えば、石井茂著「量子コンピュータへの誘い」日経 BP 社（2004 年）、ジョージ・ジョンソン著（水谷淳訳）「量子コンピュータとは何か」早川書房（2004 年）など

⁶³ 図 29、図 30：山本喜久、N I I オープンハウス基調講演（学術総合センター）平成 20 年 6 月 5 日より

⁶⁴ NP 完全問題：要素の数を n としたとき、計算時間が n^8 などの多項式で表される問題と n 乗にな

この応用には気象の予測、蛋白質の立体形の予測等の生命現象、新薬の開発等、経済、社会問題の最適化等、非常に幅広く、有用なアプリケーションに使える。量子情報処理によって到来すると思われる社会の一例を図 33 に示す。

また、少し古いが文部科学省の科学技術政策研究所、科学技術動向研究センターの雑誌「科学技術動向」2002 年の 4 月号（「量子コンピュータの研究開発動向」）によれば、米国は政府プロジェクトとしては、毎年発表されている米国情報通信政策の予算要求書（1996 年 11 月）及び実行計画書（1997 年 1 月）の中で High End Computing and Computation（HECC）プログラムの一つとして初めて量子コンピュータが取り上げられている。ここでは、バイオ、光コンピュータとともに研究をサポートすべき将来技術として扱われている。また、また米国国防総省高等研究計画局（DARPA）は 2001 年より「Microelectronic Device Technology」プロジェクトの下で、「Beyond Silicon」と題して、量子コンピュータを含む一連の次世代技術の研究開発を開始し、2002 年には「Beyond Silicon」をプロジェクトに格上げしている。「Beyond Silicon」プロジェクトのテーマ中で量子コンピュータ、量子通信技術に直接関連するのは「The Quantum Information Science and Technology」で、2001 年は予算実績約 14.3M\$（140 億円）、2002 年の要求予算 23.8M\$（240 億円）であり、2003 年には 27.1M\$（270 億円）の予算要求を予定している。これ以外にもナノテク関連の研究プロジェクト「Materials Science」やコンピュータサイエンス関連の「High Performance and Global Scale System」などのテーマ中に量子ドットや量子アルゴリズムなどの量子コンピュータ関連技術が挙げられている。このような量子コンピュータ研究を重視する米国の研究開発戦略は現在も変化していない。

同報告によれば、欧州では量子コンピュータを含む情報通信技術関連は、IST（Information Society Technology research）として実施されている。量子情報通信は新規技術分野である Future and Emerging Technologies（FET）内の Quantum Information Processing & Communications（QIPC）プロジェクトで行われている。2000 年から 3~4 年で QIPC 全体の研究資金は、総額約 22.4M Euro（290 億円）、そのうち EC の負担額は、約 17.2M Euro（総額の約 77%）であった。

また、最近ではオーストラリアが、3 研究機関から構成された量子コンピュータセンターを設立し、常勤研究員が 60 名、流動研究員も入れると 100 名もの研究者が働いているとの情報がある。

一方、このような国家的な動きとは別の動きもある。2007 年カナダの「D-Wave Systems」というベンチャー企業が超伝導ジョセフソン素子を使った量子コンピュータ

る問題がある。n 乗になる問題を NP 問題という。n が大きくなると現在のコンピュータでは実用的な時間では解が出せない。NP 問題の中で最も難しい問題を NP 完全問題という。

(28 キュービット) を実現したという発表を行った。発表の量子コンピュータの性能等についてはまだよく分かっていないが、投資ファンドに支えられて開発を進めている。この企業は NP 完全問題を解くことを目標にして、開発を進めている。

参考文献

No	書誌事項
1	Tarucha S., Austing D.G., Honda T., van der Hage R.J., Kouwenhoven L.P., “Shell Filling and Spin Effects in a Few Electron Quantum Dot”, Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 3613.
2	Sasaki S, De Franceschi S, Elzerman JM, van der Wiel WG, Eto M, Tarucha S, Kouwenhoven LP Kondo effect in an integer-spin quantum dot Nature 405, 764-767, 2000
3	van der Wiel WG, De Franceschi S, Fujisawa T, Elzerman JM, Tarucha S, Kouwenhoven LP The Kondo effect in the unitary limit Science, 289, 2105-2108, 2000
4	Hatano T, Stopa M, Yamaguchi T, Ota T, Yamada K, Tarucha S Electron-spin and electron-orbital dependence of the tunnel coupling in laterally coupled double vertical dots Phys Rev Lett, 93, 066806, 2004
5	M.Yamamoto, M.Stopa, Y.Tokura, Y.Hirayama, and S.Tarutya, Coulomb drag between quantum wires: magnetic field effects and negative anomaly Physica E, 12, pp726-729(2002)
6	Fujisawa T, Austing DG, Tokura Y, Hirayama Y, Tarucha S Allowed and forbidden transitions in artificial hydrogen and helium atoms Nature, 419, 278-281, 2002
7	Ono K, Austing DG, Tokura Y, Tarucha S Current rectification by Pauli exclusion in a weakly coupled double quantum dot system Science, 297, 1313-1317, 2002
8	Ono K, Tarucha S Nuclear-spin-induced oscillatory current in spin-blockaded quantum dots Phys Rev Lett, 92, 256803, 2004
9	Inoshita T, Tarucha S Dynamics of electrons and nuclei in double quantum dots in the spin-blockade regime J Phys Soc Jpn 72, Suppl A , 183-184, 2003
10	Elzerman JM, Hanson R, van Beveren LHW, Witkamp B, Vandersypen LMK, Kouwenhoven LP Single-shot read-out of an individual electron spin in a quantum dot

	Nature, 430, 431-435, 2004
11	Tokura Y, van der Wiel WG, Obata T, Tarucha S Coherent single electron spin control in a slanting Zeeman field Phys Rev Lett, 96, 047202, 2006
12	Pioro-Ladriere M, Tokura Y, Obata T, Kubo T, Tarucha S Micromagnets for coherent control of spin-charge qubit in lateral quantum dots Appl Phys Lett, 90, 024105, 2007
13	Pioro-Ladriere M, Tokura Y, Obata, T, Kubo T, Yoshida K, Tarucha S Spin-charge qubit resonance readout in lateral quantum dots Physica E, 40, 347-350, 2007
14	Pioro-Ladriere M, Obata T, Tokura Y, Shin YS, Kubo T, Yoshida K, Taniyama T, Tarucha S Electrically driven single-electron spin resonance in a slanting Zeeman field Nature Phys, 4, 776-779, 2008
15	Hanson R, Kouwenhoven LP, Petta JR, Tarucha S, Vandersypen LMK Spins in few-electron quantum dots Rev. Mod. Phys. 79,1217-1265 (2007)
16	Baugh J, Kitamura Y, Ono K, Tarucha S Large nuclear overhauser fields detected in vertically coupled double quantum dots Phys Rev Lett, 99, 096804, 2007
17	Hatano T, Stopa M, Tarucha S Single-electron delocalization in hybrid vertical-lateral double quantum dots Science, 309, 268-271, 2005
18	Amaha S, Hatano T, Kubo T, Teraoka S, Tokura, Y, Tarucha S, Austing DG Stability diagrams of laterally coupled triple vertical quantum dots in triangular arrangement Appl Phys Lett, 94, 092103, 2009
19	Yamamoto M, Stopa M, Tokura Y, Hirayama Y, Tarucha S Negative coulomb drag in a one-dimensional wire Science, 313, 204-207, 2006