

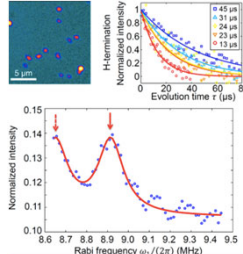
# 慶應義塾大学スピロニクス研究開発センタープロジェクト一覧

## 研究プロジェクト名: ダイヤモンドナノ核磁気共鳴(NMR)

**アウトライン:** ダイヤモンド中の個々の量子ビットをセンサーとして、単一または少数の原子・分子や細胞の核磁気共鳴(NMR)測定や電位分布測定を室温で実現する実験手法を確立する。同位体ダイヤモンド表面傍(数nm)に100マイクロ秒以上の量子コヒーレンス時間を有する空孔(NV)ペアを配置し、個々のNVペアに束縛された電子スピンを制御する手法を開発し、単一NV電子スピンを磁気センサーとしてダイヤモンド外部に置かれた単一原子核等の核磁気共鳴(NMR)検知を目指す。NV磁気センサーの感度は、測定対象の磁気双極子までの距離とNV電子スピンのコヒーレンス時間に依存するため、それらを最適化したダイヤモンド薄膜材料を産総研が作製し、その評価と核磁気共鳴応用を慶應義塾が実施する。また、ここで最適化された材料は世界の研究機関にも配布され分野全体の発展に寄与する。(右下の図はNano Letters 13, 4733 (2013)より転写)

**コメンター:** 伊藤公平、早瀬潤子、阿部英介(慶應義塾大)、渡邊幸志(産総研)、原田慶恵(大阪大)、鹿田真一(関西学院大)、Christian Degen(スイスETH)、Fedor Jelezko(独Ulm Univ.)

**他分野・社会に対するインパクト:** 本研究により、物性物理学等の学術研究の発展に必要とされる局所的NMR測定が実現する。応用面においては、例えばLab on Chip(マイクロ流体工学)といったガラス基板上のマイクロチップ工場においても局所的なNMR分析が実現できるようになる。また、本研究で開発された評価系を小型化することで、デスクトップ型の単一(または少数)分子NMR装置が完成し、グリーンや創薬といった重点分野を含む産業の発展を担う計測技術基盤に発展することが期待される。

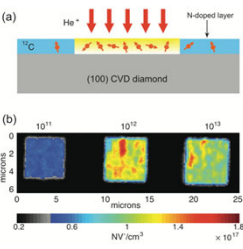


## 研究プロジェクト名: ダイヤモンド量子イメージング

**アウトライン:** ダイヤモンド中の個々の空孔・空孔(NV)ペア量子ビットを磁気センサーとして、それらをダイヤモンド表面上に密に2次元配置することから、磁場分布イメージセンサーを開発する。個々のNVペアがイメージャーの画素(ピクセル)として働き、NV二次元アレイ上に測定対象は乗せることで磁場分布イメージングを行う。個々のNVは原子レベルの小ささで、量子力学的な動作原理に基づくセンシングを行うため、原理的には究極の位置分解能と感度が得られる。個々のNVペアピクセルの感度は、測定対象の磁気双極子までの距離とNV電子スピンのコヒーレンス時間に依存するため、それらを最適化したダイヤモンド薄膜材料を産総研が作製し、その評価とイメージングを実現する計測系の構築を慶應義塾が実施する。また、ここで最適化された材料は世界の研究機関にも配布され分野全体の発展に寄与する。(右下の図は共著論文Applied Physics Letters 108, 202401 (2016)より転写)

**コメンター:** 伊藤公平、早瀬潤子、阿部英介(慶應義塾大)、渡邊幸志(産総研)、原田慶恵(大阪大)、Kai-Mei Fu(Univ. Washington)

**他分野・社会に対するインパクト:** 本研究により、物性物理学等の学術研究の発展に必要とされる超高感度イメージング評価手法が確立される。また、様々な分子や細胞中の磁場分布イメージング、ハードディスクや半導体チップの磁場イメージングに基づく評価技術の確立等につながることも期待される。電子やイオンの移動による微細電流経路の分布も、そこから生じる磁場を高精度で検知することにより可能になるため、様々な産業応用が可能となる。

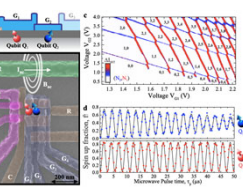


## 研究プロジェクト名: 量子ドット型シリコン量子コンピュータ

**アウトライン:** 同位体組成制御を通じて、通常は4.7%含まれる<sup>29</sup>Si核スピンを除去した直径100nmの<sup>28</sup>Siエピウエハーを慶應義塾グループが作製し、そのウエハー上にUniv. New South Walesグループが、量子ドット型の電子スピ量子ビットを半導体微細加工技術を用いて作製する。ウエハー上の量子ドットの配置は微小(幅30nm)ゲート電極の位置で決まり、ゲート電極に正の電圧を印加することで、ゲート電極直下に電子を0, 1, 2, 3...と数えながら置くことができる。ここで、ちょうど1個の電子をゲート直下に置く状態で電子スピ量子ビットを完成させ、それらをウエハー表面上に2次元状に配置することで、集積型シリコン量子コンピュータの実現を目指す。この開発過程において、各々の量子ビット電子スピンのコヒーレンスや、量子ビット間の相互作用などを調べ、物性物理学や量子情報科学の発展に学術的に寄与する。(右下の図は共著論文Nature 526, 410 (2015)より転写)

**コメンター:** 伊藤公平(慶應義塾大)、Andrew Dzurak, Andrea Morello(豪Univ. New South Wales)

**他分野・社会に対するインパクト:** ムーアの法則に基づくシリコンICの発展が限界を迎えつつある近年、従来型シリコンチップでの不可能の一部を量子コンピューティングによって可能にする技術の開発が注目されている。カナダのD-Wave社に加え、米Google社やIntel社も量子コンピュータの開発を急いでいる。慶應義塾の本グループは、既存産業技術との互換性を重視することから、シリコンに基づくスピ量子計算の優位性と原理実証を、シリコン同位体工学という独自のアプローチによって提示する。

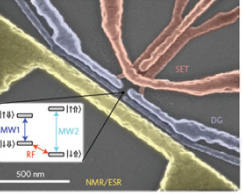


## 研究プロジェクト名: シリコン中のリンドナー量子ビット

**アウトライン:** 同位体組成制御を通じて、通常は4.7%含まれる<sup>29</sup>Si核スピンを除去した直径100nmの<sup>28</sup>Siエピウエハーを慶應義塾グループが作製し、そのウエハー表面上にMelbourneグループが、単一リン(P)ドナーを導入する。また、リンが注入された領域を囲むように単電子トランジスタ(SET)と電子磁気共鳴検出用マイクロ波共振回路が半導体微細加工技術によってUniv. New South Walesグループにより作製される。この素子を100ミリケルビン以下の低温で冷却し、単一のリンドナーによって束縛された一つの電子スピンを一つの量子ビット、また、リン原子核の<sup>31</sup>P核スピンをもう一つの量子ビットとして、2量子ビットの計算を実施する。このとき各々の量子ビットのコヒーレンスや、量子ビット間の相互作用などを調べ、物性物理学や量子情報科学の発展に学術的に寄与する。(右下の図は共著論文Nature Nanotechnology 11, 242 (2016)より転写)

**コメンター:** 伊藤公平(慶應義塾大)、Andrew Dzurak, Andrea Morello(豪Univ. New South Wales)、D. N. Jamieson, J. C. McCallum(豪Melbourne Univ.)

**他分野・社会に対するインパクト:** ムーアの法則に基づくシリコンICの発展が限界を迎えつつある近年、従来型シリコンチップでの不可能の一部を量子コンピューティングによって可能にする技術の開発が注目されている。カナダのD-Wave社に加え、米Google社やIntel社も量子コンピュータの開発を急いでいる。慶應義塾の本グループは、既存産業技術との互換性を重視することから、シリコンに基づくスピ量子計算の優位性と原理実証を、シリコン同位体工学という独自のアプローチによって提示する。

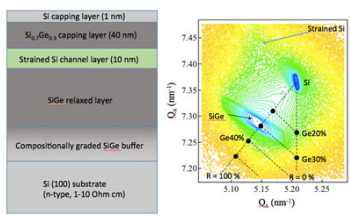


## 研究プロジェクト名: Si/SiGe量子コンピュータ用同位体基板の開発

**アウトライン:** 米Intel社がSi/SiGe構造に基づく量子コンピュータ開発に本腰を入れ、10年程度で製品化を目指すことを2015年に発表した。すでに同社オレゴン州ポートランド近郊の最先端試作ラインで、量子コンピュータ専用の直径300mm Si/SiGeウエハーの開発に着手し、その進捗を学会で報告するようになった。しかし、単一の電子スピンをSi層に閉じ込めるこの構想では、深刻なノイズ源である<sup>29</sup>Si安定核スピ同位体をSi層から取り除いた構造を作製する必要がある。そして、<sup>29</sup>Si核スピを取り除くことにより、どの程度ノイズが減少し、電子スピ量子ビットのコヒーレンス時間が延ばせるかを定量的に評価する必要がある。本研究においては、同位体工学を駆使することにより、<sup>29</sup>Si核スピを取り除いたSi/SiGe基板を世界にさきがけて開発し、それを用いた量子ビット開発に取り組むことで、Intelといった企業の量子コンピュータ開発を先導する。

**コメンター:** 伊藤公平(慶應義塾大)、宇佐美徳隆(名古屋大)、星裕介(東大)、澤野憲太郎(東京都大)

**他分野・社会に対するインパクト:** ムーアの法則に基づくシリコンICの発展が限界を迎えつつある近年、従来型シリコンチップでの不可能の一部を量子コンピューティングによって可能にする技術の開発が注目されている。カナダのD-Wave社に加え、米Google社やIntel社も量子コンピュータの開発を急いでいる。慶應義塾の本グループは、既存産業技術との互換性を重視することから、シリコンに基づくスピ量子計算の優位性と原理実証を、シリコン同位体工学という独自のアプローチによって提示する。

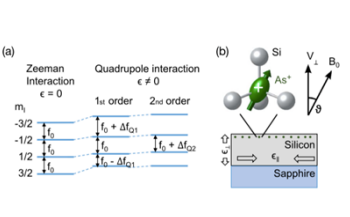


## 研究プロジェクト名: Si/SiGe量子コンピュータ用同位体基板の開発

**アウトライン:** シリコン中のドナー不純物に関連する電子スピ量子ビットとして量子情報処理技術を開発する競争が世界的に激化している。このとき、電子スピ量子ビットの量子情報保持(コヒーレンス)時間の評価や、スピエネルギー準位に対する歪みや電界の効果を実験により理解しモデル化することが重要となる。そこで本研究では、不純物電子磁気共鳴による変化による電気伝導度の変化を検知するEDMR法により、電子・核スピエネルギー準位の変化やコヒーレンスを定量的に評価する。スピ依存再結合および異なる特殊モードを利用することで、従来の電子スピ共鳴法をはるかに上回る感度をEDMR法で得ることに成功し、最近ではドナー不純物の原子番号に依存する核スピ四重極子相互作用の詳細を解明する実験と解析にも成功している。(右下の図は共著論文Physical Review Letters 115, 057601 (2015)より転写)

**コメンター:** 伊藤公平(慶應義塾大)、Martin Brandt(独TU Munchen)、Leonid Vlasenko(露St. Petersburg Polytech. Univ.)

**他分野・社会に対するインパクト:** ムーアの法則に基づくシリコンICの発展が限界を迎えつつある近年、従来型シリコンチップでの不可能の一部を量子コンピューティングによって可能にする技術の開発が注目されている。カナダのD-Wave社に加え、米Google社やIntel社も量子コンピュータの開発を急いでいる。慶應義塾の本グループは、既存産業技術との互換性を重視することから、シリコンに基づくスピ量子計算の優位性と原理実証を、シリコン同位体工学という独自のアプローチによって提示する。

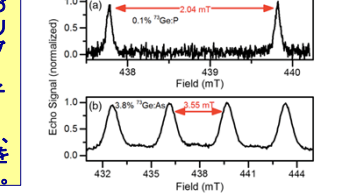


## 研究プロジェクト名: Si&Ge半導体中の新しい量子ビットの探索

**アウトライン:** シリコン(Si)およびゲルマニウム(Ge)は半導体産業が最先端ICを開発するプラットフォームである。それだけにSiまたはGeで量子コンピュータが開発されれば、既存のシリコンICとの集積化が可能になる。このような観点から、Si中の量子ドットやドナー不純物を量子ビットとして利用する研究開発が世界的に激化しているが、量子ドットやドナー以外にSiまたはGe中で量子ビットの候補はある。具体的にはSi中のI=1/2の核スピンを有する<sup>29</sup>Si量子ビットやホウ素(B)などのアクセプタ量子ビット、Ge中のドナー不純物など、研究コミュニティが注目していない宝の山がたくさんある。そこで本プロジェクトでは国際的な共同研究体制を構築し、SiおよびGe半導体中のいまだに注目されていない量子ビットの候補を探索し、その物性を解明する。(右下の図は同位体制御されたGe中のPおよびAsドナーの電子スピ共鳴: 共著論文Physical Review Letters 115, 247601 (2015)より転写)

**コメンター:** 伊藤公平(慶應義塾大)、Martin Brandt(独TU Munchen)、John Morton(英Univ. College London)、Steve Lyon(米Princeton Univ.)、Mike Thewalt(加Simon Fraser Univ.)

**他分野・社会に対するインパクト:** ムーアの法則に基づくシリコンICの発展が限界を迎えつつあり、従来型シリコンチップでの不可能の一部を量子コンピューティングによって可能にする技術の開発が注目されている。カナダのD-Wave社に加え、米Google社やIntel社も量子コンピュータの開発を急いでいる。慶應義塾の本グループは、既存産業技術との互換性を重視することから、SiやGeに基づくスピ量子計算の優位性と原理実証を、同位体工学という独自のアプローチによって提示する。



## 研究プロジェクト名: CNT上超伝導ナノワイヤーと量子デバイス開発

**アウトライン:** ナノカーボン材料をテンプレートとした微細な超伝導ナノワイヤー成長法を構築し、低次元超伝導体で発現する量子現象の観測やそれを用いた量子デバイス開発を行う。従来のリソグラフィ技術では実現が難しい10ナノメートルオーダーの超伝導ナノワイヤーを実現する手法を開発するとともに、それを用いてシリコンチップ上の超伝導量子デバイスを実現する。これにより、ナノサイズ化した超伝導体で発現する様々な量子現象(量子位相スリッパや超伝導絶縁体転移など)の直接観測を目指す。さらに、超伝導ナノワイヤーを用いることで、単一磁束やその重ね合わせを利用した量子ビット、超高感度光検出器などの新たな超伝導量子デバイス応用も開拓する。(右下の図はAppl. Phys. Lett. 108, 222601 (2016)より転写)

**コメンター:** 牧英之(慶應義塾大)、森山悟士(NIMS)、守田佳史(群馬大)

**他分野・社会に対するインパクト:** ナノカーボン材料をテンプレートとした本手法は、従来の超伝導デバイスで課題となっていたリソグラフィ技術の限界を超える新たなナノワイヤー系製法であることに加えて、多元素を含む様々な材料系に適用できることやシリコンチップ上でのデバイス作製も可能であることから、本手法は、超伝導量子物性探索や新たな超伝導量子デバイス開発を可能にする。特に、近年注目されている、超伝導量子コンピュータや超高性能光検出器といった実用的なデバイスの開発も期待される。

