

「量子情報処理システムの実現を目指した新技術の創出」

平成17 年度採択研究代表者

北川 勝浩

大阪大学大学院基礎工学研究科・教授

分子スピン量子コンピュータ

§ 1. 研究実施の概要

分子の核スピンを用いた真の量子計算を実現するために、光励起三重項状態を用いた動的核偏極(triplet-DNP)による物理的初期化と固体 NMR による量子演算、およびそれらを連続して実行する方法について研究を行った。物理的初期化については、目標とする到達偏極率 70%は未達成であるが、20%以上の偏極率に分単位で到達する高速化を実現した。さらに、量子ビットとして使用可能なフッ素核を複数持つ分子を共ドープして、それらを高偏極化することに初めて成功した。固体NMR量子演算では、共振器を含む系の分散性による応答を測定して、それを補償するパルス照射することによって、位相過渡現象を解決した。これによって、共振器内に精密な高周波磁場を発生できるようになり、磁気共鳴による量子演算の精度を飛躍的に向上させて、誤り耐性閾値を達成する可能性を拓いた。また、電子スピン量子演算のためのKuバンド電子スピン多重共鳴装置のプロトタイプを開発し、スピンエコーを観測した。今後は、triplet-DNP/NMR による量子情報処理実験を行うとともに、共振器過渡現象の補償をハミルトニアン工学と結び付けて量子演算精度の向上を測り、それを電子スピンにも適用する。

開殻系分子の電子スピンを qubit とする量子コンピュータの開発を目的として、昨年度までに設計(g-Engineering 及び pseudo g-Engineering)・合成してきた典型的な分子性安定ビラジカル・2電子系の磁氣的希釈単結晶について、X 線構造解析・スピン物性の全解析を完成し、パルス ELDOR 法による電子スピン双極子相互作用と弱い交換相互作用の実験的分離抽出を初めて行った。(2電子 qubit 系の初期化のためのパルス系列プロトコル、2電子 biradical 系の entanglement、基本論理ゲート構築に特化した QC/QIP 実験を最終 1/4 期で実施する。) Coherent Dual QC-ELDOR 実験では、速い時間分解能の要請に応えるためのQバンドの電力増幅(40W TWT アンプの装備・制御)の課題を解決し、極低温 QC 実験のルーチン化を実現した。1次元 Lloyd モデルのプロトタイプ、DNA-based biradical、及び3-4電子 qubits 分子系を、本年度 3/4 期に計画前倒しで合成した。(これらの多電子系について QC-ELDOR 実験を、最終 1/4 期の実施する。)

高精度の基本的量子計算素子の実現を阻む不可避な量子雑音の性質を解明することを目的とし、不確定性原理と保存則に由来する測定誤差および計算誤り確率に関する数学理論を構築することにより、ウィグナー・荒木・柳瀬の定理の一般化公式、任意の量子ゲートの誤差公式、量子雑音プロセス推定のフィッシャー情報量の公式を導出し、また、これらの知見を応用して量子アルゴリズムの研究開発を行った。

巨視的な人工スピンあるいは少数準位原子とも言うべき超伝導磁束量子ビットを中心に高精度な量子状態制御および読み出しを実現することを目指している。散逸の小さい超伝導量子回路では、量子ビットだけでなく、線形あるいは非線形の共振器また伝送線路も容易に実現される。巨大な双極子モーメントを持つ人工原子とこれらの電磁場モードとの組み合わせにより、マイクロ波帯域の量子光学実験を基板上で実現することを目指してきた。今年度は主に、超伝導量子ビットを2つあるいは3つのエネルギー準位を持つ人工原子として用い、これを超伝導共振回路や超伝導伝送線路と強く結合させた場合に起こる量子光学的効果の実験を行い、成果を得た。このような技術は、量子演算回路における量子情報バスなどに適用することが期待される。

§ 2. 研究実施体制

(1)「量子計算」グループ

- ① 研究分担グループ長:北川 勝浩(大阪大学、教授)
- ② 研究項目
 - (1) 分子の核スピンによる真の量子計算
 - (2) 分子の電子スピンによる量子演算

(2)「分子電子スピン」グループ

- ① 研究分担グループ長:工位 武治(大阪市立大学、教授)
- ② 研究項目
分子の電子スピンを活用した量子コンピュータ

(3)「フォールトトレラント量子計算理論」グループ

- ① 研究分担グループ長:小澤 正直(東北大学/名古屋大学、教授/教授)
- ② 研究項目
 - (1) 不確定性原理と保存則に由来する量子雑音の研究
 - (2) 量子計算素子の誤り確率に関する一般理論の展開
 - (3) 量子アルゴリズムに関する応用研究
 - (4) 量子雑音理論の量子暗号への応用

(4)「超伝導量子回路」グループ

①研究分担グループ長:中村 泰信((独)理化学研究所、研究員)

②研究項目

- (1) 超伝導量子ビット回路および共振回路の量子制御
- (2) 超伝導非線形共振回路のダイナミクスおよび量子ビット読み出しへの適用
- (3) 超伝導量子演算回路方式の検討
- (4) 超伝導量子ビット制御および読み出しの高精度化とデコヒーレンス要因の究明
- (5) 超伝導量子ビットと共振回路および伝送線路との結合

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

A. 分子の核スピンを用いた真の量子計算、電子スピン量子演算装置の開発(北川グループ)

- ① Triplet-DNP/NMR フィールドサイクリング実験系: 低磁場での光励起三重項状態を用いた動的核偏極(triplet-DNP)と高磁場での NMR 分光・量子演算を連続して繰り返すことができるフィールドサイクリング実験システムを完成させた。[1]これによって②③の研究が可能となった。

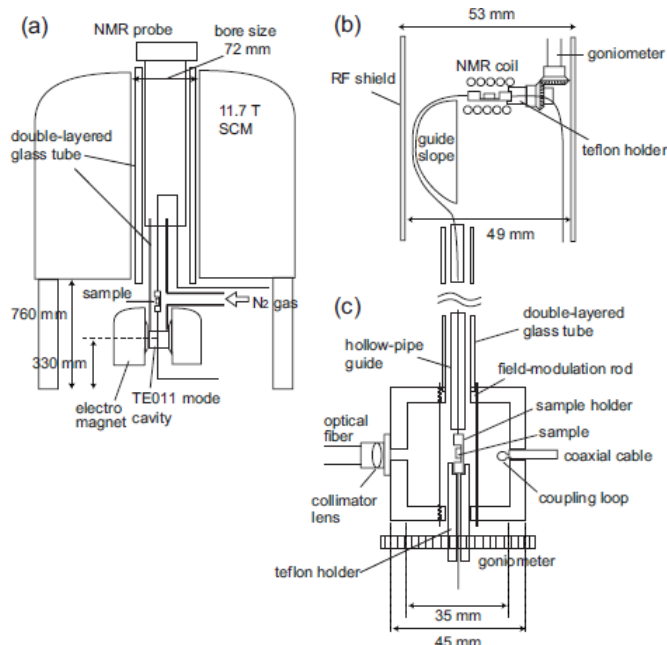


図 A-1 低磁場 Triplet-DNP/高磁場 NMR フィールドサイクリング系

② Triplet-DNP による初期化の高速化：
 これまで triplet-DNP による初期化には長時間(1~10 時間)かかっていたが、その高速化を達成した。室温で安定なパラ・ターフェニル結晶をホストとして、ペンタセンを高濃度でドーピングすることによって、室温・低磁場(0.4T)で偏極率 18%を 5 分で達成した。(図 A-2(a)) さらに、ホスト結晶分子を部分的に重水素化し、その重水素化率を最適化することによって、偏極率 22%を 100 秒で達成した。(図 A-2(b))

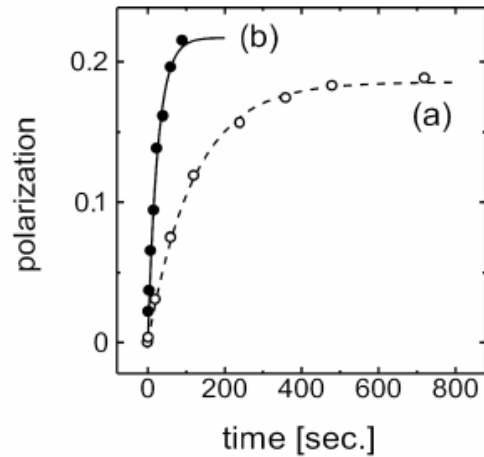


図 A-2 Triplet-DNP による高偏極化

③ 冷えた熱浴による量子計算用分子の高偏極化： これまで triplet-DNP でプロトンを高偏極化することには成功していたが、プロトンはホスト結晶中でスピン拡散によって偏極を運ぶ担体として働くため、量子ビットとしては別の核種を使う必要がある。そこで、ナフタレン結晶ホストに triplet-DNP 用分子のペンタセンと共にドーピング可能な量子計算用分子を探索し、量子ビットとして使用可能な 2 つの磁氣的に非等価なフッ素を持つ 2,3-difluoronaphthalene を共ドーピングすることに成功した。さらに、ゼロ磁場近傍でプロトンとフッ素核の双極子相互作用によってプロトンの高偏極をフッ素核に移すことに成功した。フッ素核の偏極が緩和しても、ゼロ磁場近傍でプロトンと相互作用させることによって、何度でも高偏極化でき、triplet-DNP で高偏極化したプロトンが冷えた熱浴として作用することが確認された。

④ 共振器パルス過渡現象の全補償： 昨年度行った振幅過渡現象の補償では、共振器の応答の形を仮定し、中心周波数と Q (または ν) という 2 つのパラメータのみで補償を行った。[2] 本年度は、共振器、伝送線路、アンプなどを含む入力電圧から共振器内の磁場への応答を実測することによって、振幅・位相ともに所望の波形を共振器内に実現する、全補償の実験を成功させた。これによって、NMR 分光で長年の課題であった位相過渡現象を解決した。[3]

位相過渡現象は、特に共振器の中心周波数からずれたオフレゾナンスで顕著であるが、この方法で補償することによって、核スピンの化学シフトや電子スピンの g 因子で量子ビットを増やした場合でも、どのスピンの対してもチャージングの無いパルスが打てるようになる。さらに、共振器内で精密に再現可能なパルス波形に基づいて、ハミルトニアン工学を再構築し、実験とのギャップを埋めることも可能となる。磁気共鳴による量子演算精度を飛躍的に高めて、誤り耐性閾値をクリアすることを目指している。

⑤ 極低温 Ku バンドパルス電子スピン多重共鳴装置： TWTのアイドル時の雑音の問題を

解決するため、パルスTWTを導入し、スピンエコーが観測可能となった。今後は、中村グループの協力も得ながら極低温での実験を行うとともに、工位グループが開発した2～3qubitの電子スピンqubit分子の電子スピン多重共鳴分光と量子演算実験を行って行く。

B. 分子の電子スピンを用いた量子コンピュータ(工位グループ)

弱交換相互作用2及び多電子スピン量子ビット分子系を設計し、電子スピンQC/QIP実験に対応できる具体的な分子スピン希釈単結晶系を複数個設計・合成し、一般的な分子スピンqubitの設計指針を確立すること、電子スピン系の相互位相制御技術、パルス系列プロトコルを確立し、電子スピンのみのQC/QIPを実証することを目標としてきた。具体的な分子スピン系として2及び3-4電子スピン分子性結晶系等のアンサンブル系で電子スピンqubitを活用した実験を行い、最終的には電子スピンの優位性としてのsynthetic scalabilityを示す。本年度の研究実施内容は、以下のとおりである。

電子スピンQC/QIPの開発に適した2、及び多電子スピン分子性希釈単結晶系を新たな指針に基づいて[文献番号:原著論文 2,14]、新規物質として複数個合成し、電子スピンの位相を制御したパルス電子スピン磁気共鳴の実験環境を構築した[原著論文 14]。3, 4電子スピン系の物質開発を行い、QC実験に適した分子系であるかを、結晶構造・スピン物性、及びg-engineeringの観点から解明した。また、電子スピン制御技術としては、2電子スピン系の初期化のための多チャンネル化、位相制御マイクロ波技術開発に着手し、3-4電子系qubits分子を扱う準備を行った(最終H.22年度の課題)。マイクロ波高出力CD(Coherent-Dual)QバンドELDOR装置の完成・長時間ルーチン稼動体制を確立した。Pulse-based CD-ELDOR/ENDORを駆使した、多電子スピン系の電子スピン位相制御を可能とするパルスプロトコルを開発中である。1.4Kをベース温度とするQC-Qバンド用極低温大容量クライオスタットの製作・積算時間の延長を可能にするクライオスタットの改良を実現することができ、特に検出感度は2桁以上向上した。これにより、matter qubit系(電子、及び核スピン系)でのエンタングルメント状態に関して、電子スピンと核スピンを同等に扱い、3 qubits系でのentanglementを実現した。

C. フォールトトレラント量子計算(小澤グループ)

量子計算素子の誤り確率に関する一般理論の展開

量子計算素子には、デコヒーレンスによる誤りが不可避であり、フォールトトレラントな量子コンピュータの実現を目指すためには、まず、デコヒーレンスによる誤りの原理的境界を明らかにする必要がある。デコヒーレンスは、環境との相互作用に由来するものと制御系との相互作用に由来するものの2種に分けられる。前者は相互作用の抑制という方向で回避することが可能であるのに対して、後者には相互作用の抑制が正確な制御を可能にすることと矛盾するため、不可避なデコヒーレンスが原理的に存在することが予想される。本研究では、デコヒーレンスによる原理的制約を制御系との相互作用が満たす保存法則から導くことを目指し、任意のユニタリゲート(1量子ビットのユニタ

り変換)の任意の保存法則のもとでの実装に関するゲート非忠実度の一般的な下限を研究した。任意のユニタリゲート U_S を任意の加法的保存量 L_S+L の存在のもとで実装すると、実装されたゲートのユニタリゲート U_S に対する非忠実度が、 $B=\sin^2(\theta/2)\sin^2\Psi(1-\sin^2(\theta/2)\sin^2\Psi)/(1+\sigma(L/c)^2)$ 以上であることが得られた¹⁾。ここに、 L_S は量子ビット系の保存量、 L は制御系の保存量、 Ψ は L_S が生成する Bloch 球の回転軸と U_S が生成する回転軸との相対角、 θ は U_S が生成する Bloch 球の回転角 (U_S の固有値の偏角の差)、 c は L_S の任意の状態における標準偏差の最大値 (L_S の固有値の差の絶対値の $1/2$) を表す。一方、 L_S の回転軸を U_S の回転軸の周りに θ 回転させた軸と回転させる前の L_S の回転軸との間の角を 2γ とすると、この値は、 $B=\sin^2 2\gamma/(4+4\sigma(L/c)^2)$ と表すこともできる¹⁾。 U_S の固有値が ± 1 、すなわち U_S が自己共役の場合は、 $\theta=\pi$ なので、 $B=\sin^2 2\Psi/(4+4\sigma(L/c)^2)$ が得られる。この結果により、スピン $1/2$ の量子ビット上の任意のユニタリゲートをスピン $N/2$ 系の制御系との回転不変な相互作用で実装する場合に、 $0\leq\theta\leq\pi/2$ の場合に非忠実度が $\sin^2\theta/(4+4N^2)$ 以上になり、 $\pi/2\leq\theta\leq\pi$ の場合に非忠実度が $1/(4+4N^2)$ 以上になることが示された。アダマールゲートや NOT ゲートは $\theta=\pi$ の場合で、これらに対しては、非忠実度が $1/(4+4N^2)$ 以上になる。これにより、全ての1量子ビットゲートに対して、角運動量の保存法則から、アンシラのスピン量子数の2乗に反比例するゲート実装の不可避な誤差が導かれることが明らかになった。また、2準位原子と単一モード電磁場の相互作用のように Jaynes-Cummings モデルで記述される場合は、 $L_S=\sigma_z$ 、 $L=2a^\dagger a$ であり、制御系の状態が平均光子数 n のコヒーレント状態の場合、 $c=1$ 、 $\sigma(L/c)^2=4\sigma(a^\dagger a)^2=4n^2$ 、となるので、 $B=\sin^2 2\gamma/(4+16n^2)$ が得られる。ただし、 2γ は、 z 軸を U_S の回転軸の周りに θ 回転させた軸と回転させる前の z 軸との間の角である。デコヒーレンスには様々な要因があり、この限界に直ちに到達できると期待することはできないが、限界が平均光子数の2乗に反比例することから同一のエネルギー・リソースのもとでは、振動数の小さい電磁波による制御に優位性があることが結論される。

D. 超伝導(中村グループ)

巨視的な人工スピンあるいは少数準位原子とも言うべき超伝導磁束量子ビットを中心に高精度な量子状態制御および読み出しを実現することを目指している。散逸の小さい超伝導量子回路では、量子ビットだけでなく、線形あるいは非線形の共振器また伝送線路も容易に実現される。巨大な双極子モーメントを持つ人工原子とこれらの電磁場モードとの組み合わせにより、マイクロ波帯域の量子光学実験を基板上で実現することを目指してきた。今年度は主に、超伝導量子ビットを2つあるいは3つのエネルギー準位を持つ人工原子として用い、これを超伝導共振回路や超伝導伝送線路と強く結合させた場合に起こる量子光学的効果を調べた。

Sherbrooke 大学との共同研究では、磁束量子ビットと超伝導共振器の相互作用を理論的に検討し、原子と共振器の間の結合強度が共振器の共振周波数と同じオーダーに達する「超」強結合領域の実現の可能性を見出した¹⁾。従来の原子などを用いた量子光学実験では到達の困難であった現象の実現が期待される。

一方、実験では磁束量子ビットを1次元の超伝導マイクロ波平面型伝送線路と強く結合し、共

鳴蛍光の観測を行なった。1次元に閉じ込められた伝播モードの特徴を活かして入射モードと反射モードの完全なマッチングを実現し、透過マイクロ波の消光比 94%を得た。また非弾性散乱光の観測により Mollow 三重項の観測に成功した⁵⁾。さらに人工原子の第3のエネルギー準位を利用することで、電磁誘起透過現象や(投稿中)、マイクロ波励起による反転分布の生成によるプローブマイクロ波の増幅効果を観測した(Phys. Rev. Lett. 掲載予定)。これらの一連の実験は、人工原子としての超伝導量子ビットが、1次元伝送線路を伝播するマイクロ波光子とコヒーレントに相互作用することを示し、マイクロ波フォトニック回路における重要な要素となりうることを示した。通常開放空間への光子の自発放出は超伝導量子ビットのデコヒーレンス要因とみなされるが、上記の散乱問題においてはあくまでコヒーレントな過程の一部であることが興味深い。

この結果と関連して、東京医科歯科大学と共同で、1次元モード上を伝播する光子を用いた量子ビット間の決定論的な $\sqrt{\text{SWAP}}$ ゲートを実現する方法を提案した(投稿中)。この提案では Λ 型3準位系が入射する光子量子ビット列を反射する際に光子間にエンタングルメントを生成するものであり、3準位原子は完全に受動的に使用されるところが新しく優れた点である。偏光依存した遷移の選択捉を利用しているため今のところ超伝導量子ビットではなく、量子ドット中の電子励起などの方が実現しやすいと考えられるが、超伝導量子ビットへの応用も検討中である。

駆動された超伝導非線形共振器を用いた磁束量子ビットの非破壊単一事象読み出しにも取り組んでいる。今年度はそのために必要な共振器の基礎的な特性の評価を行い、非線形性や駆動時の分岐現象について調べた^{3,4)}。現在量子ビット読み出しの高精度化に取り組んでいる。

磁束量子ビットのデコヒーレンスに関して MIT のグループと共同研究を行い、エネルギー緩和時間 11.5 マイクロ秒、エコー緩和時間 23 マイクロ秒というこれまでで世界最高の結果を得た。今後この試料を用いて詳細なデコヒーレンス機構の解明のためにダイナミックデカップリングなどの実験を行なう予定である。一方、エネルギーギャップ可変磁束量子ビットや結合した2つの磁束量子ビットにおいて、磁束の低周波雑音による位相緩和を調べ、低周波雑音の相関からその起源が局所的なものであることを示す結果を得た。後者については論文投稿中である。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

【北川グループ】

1. K. Takeda, Y. Tabuchi, M. Negoro, M. Kitagawa, “Active compensation of rf-pulse transients”, *J. Magn. Reson.* **197**, 242-244 (2009). DOI 10.1016/j.jmr.2009.04.003
2. Kagawa, M. Negoro, K. Takeda and M. Kitagawa, Magnetic-field cycling instrumentation for dynamic nuclear polarization-nuclear magnetic resonance using photoexcited triplets, *Review of scientific instruments* 80, 044705 (2009), Doi 10.1063/1.3123346
3. Yutaka Tabuchi, Makoto Negoro, Kazuyuki Takeda, Masahiro Kitagawa, Total compensation

of pulse transients inside a resonator, *Journal of Magnetic Resonance* (in press)

【工位グループ】

1. A. Kunishita, M. Kubo, H. Sugimoto, T. Ogura, K. Sato, T. Takui, and S. Itoh, "Mononuclear Copper(II)-Superoxo Complexes that Mimic the Structure and Reactivity of the Active Centers of PHM and D β M", *J. Am. Chem. Soc.* **131**, 2788-2789 (2009). DOI:10.1021/ja809464e
2. Y. Masuda, M. Kuratsu, S. Suzuki, M. Kozaki, D. Shiomi, K. Sato, T. Takui, Y. Hosokoshi, X.-Z. Lan, Y. Miyazaki, A. Inaba, K. Okada, "A New Ferrimagnet Based on a Radical-Substituted Radical Cation Salt", *J. Am. Chem. Soc.* **131**, 4670-4673 (2009). DOI: 10.1021/ja808093z
3. K. Sato, S. Nakazawa, R. Rahimi, T. Ise, S. Nishida, T. Yoshino, N. Mori, K. Toyota, D. Shiomi, Y. Yakiyama, Y. Morita, M. Kitagawa, K. Nakasuji, M. Nakahara, H. Hara, P. Carl, P. Hofer, and T. Takui, "Molecular electron-spin quantum computers and quantum information processing: pulse-based electron magnetic resonance spin technology applied to matter spin-qubits", *J. Mater. Chem.* **19**, 3739-3754 (2009). DOI:10.1039/b819556k
4. Y. Masuda, M. Kuratsu, S. Suzuki, M. Kozaki, D. Shiomi, K. Sato, T. Takui, K. Okada, "Preparation and magnetic properties of verdazyl-substituted dihydrophenazine radical cation tetrachloroferrate salts", *Polyhedron* **28**, 1950-1954 (2009). DOI: 10.1016/j.poly.2008.11.002
5. M. Yano, M. Manabe, M. Tatsumi, M. Oyama, K. Sato, and T. Takui, "Synthesis and properties of a redox active starburst ligand with three bispicorylamino groups and its trinuclear complexes", *Polyhedron* **28**, 1935-1939 (2009). DOI:10.1016/j.poly.2008.11.001
6. M. Yano, S. Tsuda, M. Tatsumi, M. Oyama, K. Sato, and T. Takui, "Amine-based organic high-spin systems; a room-temperature-stable one-dimensional oligoaryl triamine-based trication", *Polyhedron* **28**, 1883-1887 (2009). DOI:10.1016/j.poly.2008.10.023
7. M. Yano, Y. Okino, Y. Ichihara, M. Tatsumi, M. Oyama, K. Sato, and T. Takui, "Organic High-Spin Systems; Synthesis, Electrochemical and Spectroscopic Studies of π -Extended Tetraaryl *m*-Phenylenediamines", *Polyhedron* **28**, 1764-1767 (2009). DOI:10.1016/j.poly.2008.11.027
8. S. Suzuki, T. Takeda, M. Kuratsu, M. Kozaki, K. Sato, D. Shiomi, T. Takui, K. Okada, "Pyrene-Dihydrophenazine Bis(Radical Cation) in a Singlet Ground State", *Org. Lett.* **11**, 2816-2818 (2009). DOI: 10.1021/ol9009927
9. K. Sugisaki, K. Toyota, K. Sato, D. Shiomi, M. Kitagawa, and T. Takui, "Ab initio Calculations of Spin-Orbit Contribution to the Zero-Field Splitting Tensors of $n\pi^*$ Excited States by the CASSCF Method with MRMP2 Energy Correction", *Chem. Phys. Lett.* **477**, 369-373 (2009). DOI:10.1016/j.cplett.2009.07.007

10. T. Koto, K. Sato, D. Shiomi, K. Toyota, K. Itoh, E. Wasserman, and T. Takui, “Random-Orientation High-Spin Electron Spin Resonance Spectroscopy and Comprehensive Spectral Analyses of the Quintet Dicarbene and Dinitrene with *Meta*-Topological Linkers: Origins of Peculiar Line-Broadening in Fine-Structure ESR Spectra in Organic Rigid Glasses”, *J. Phys. Chem. A* **113**, 9521-9526 (2009). DOI:10.1021/jp9042717
11. T. Koto, K. Sugisaki, K. Sato, D. Shiomi, K. Toyota, K. Itoh, E. Wasserman, P. M. Lahti, and T. Takui, “High-Spin Nitrene Fine-Structure ESR Spectroscopy in Frozen Rigid Glasses: Exact Analytical Expressions for the Canonical Peaks and A D-Tensor Gradient Method for Line-Broadening”, *App. Magn. Reson.* **37**, 703-736 (2009). DOI:10.1007/s00723-009-0056-9
12. K. Matsumoto, D. Inokuchi, Y. Hirao, H. Kurata, K. Sato, T. Takui, and T. Kubo, “Synthesis and Identification of A Trimethylenemethane Derivative π -Extended with Three Pyridinyl Radicals”, *Org. Lett.* **12**, 836-839 (2010). DOI:10.1039/b909757k
13. Diaminotriazine-substituted nitronyl nitroxide: a novel building block for organic magnets having multiple hydrogen bonding substituents as structure-determining supramolecular synthons,
H. Tanaka, D. Shiomi, S. Suzuki, M. Kozaki, K. Okada, K. Sato, and T. Takui, *Cryst. Eng. Comm.*, **12**, pp.526-531 (2010). DOI:10.1039/b909757k
14. A. Ueda, S. Nishida, K. Fukui, T. Ise, D. Shiomi, K. Sato, T. Takui, K. Nakasuji, and Y. Morita, “Three-Dimensional Intramolecular Exchange Interaction in a Curved and Nonalternant π -Conjugated System: Corannulene with Two Phenoxy Radicals”, *Angew. Chem. Int. Ed.* **49**, 1678-1682 (2010). DOI:10.1002/anie.200906666
15. K. Maekawa, S. Nakazawa, H. Atsumi, D. Shiomi, K. Sato, M. Kitagawa, T. Takui, and K. Nakatani, “Programmed Assembly of Organic Radicals on DNA”, *Chem. Commun.* **46**, 1247-1249 (2010). DOI:10.1039/b913061f
16. Y. Masuda, H. Takeda, M. Kuratsu, S. Sugisaki, M. Kozaki, D. Shiomi, K. Sato, T. Takui, K. Okada, “Radical-substituted dihydrophenazine radical cation salts: Molecular packing structure and bulk magnetic property”, *Pure Appl. Chem.*, **82**, ASAP Article (2010). DOI:10.1351/PAC-CON-09-10-04
17. K. Sato, S. Nakazawa, R. Rahimi, T. Ise, S. Nishida, T. Yoshino, N. Mori, K. Toyota, D. Shiomi, Y. Yakiyama, Y. Morita, M. Kitagawa, K. Nakasuji, M. Nakahara, H. Hara, P. Carl, P. Hofer, and T. Takui, “Molecular electron-spin quantum computers and quantum information processing: pulse-based electron magnetic resonance spin technology applied to matter spin-qubits”, *J. Mater. Chem.* **19**, 3739-3754 (2009). Doi 10.1039/B819556k

18. T. Murata, Y. Morita, Y. Yakiyama, N. Nakasuji, "Synthesis, Crystal Structure, and Charge-Transfer Complexes of TTF Derivatives Having Two Imidazole Hydrogen-Bonding Units", *Physica B*. in press.

【小澤グループ】

1. T. Karasawa, J. Gea-Banacloche, and M. Ozawa, "Gate fidelity of arbitrary single-qubit gates constrained by conservation laws", *J. Phys. A: Math. Theor.* **42**, 225303 (2009).
Doi10.1088/1751-8113/42/22/225303

【中村グループ】

1. J. Bourassa, J. M. Gambetta, A. A. Abdumalikov Jr., O. V. Astafiev, Y. Nakamura, and A. Blais, "Ultrastrong coupling regime of cavity QED with phase-biased flux qubits", *Phys. Rev. A* **80**, 032109 (2009). DOI:10.1103/PhysRevA.80.032109
2. H. Jung, Y. Kim, K. Jung, H. Im, Y. A. Pashkin, O. Astafiev, Y. Nakamura, H. Lee, Y. Miyamoto, and J. S. Tsai, "Potential barrier modification and interface states formation in metal-oxide-metal tunnel junctions", *Phys. Rev. B* **80**, 125413 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevB.80.125413
3. K. Inomata, T. Yamamoto, M. Watanabe, K. Matsuba, and J. S. Tsai, "Film-thickness dependence of 10 GHz Nb coplanar-waveguide resonators", *J. Vac. Sci. Technol. B* **27**, 2286-2291 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevB.80.174502
4. M. Watanabe, K. Inomata, T. Yamamoto, and J. S. Tsai, "Power-dependent internal loss in Josephson bifurcation amplifiers", *Phys. Rev. B* **80**, 174502 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevB.80.174502
5. O. Astafiev, A. M. Zagoskin, A. A. Abdumalikov, Y. A. Pashkin, T. Yamamoto, K. Inomata, Y. Nakamura, and J. S. Tsai, "Resonance fluorescence of a single artificial atom", *Science* **327**, 840-843 (2010). DOI: 10.1126/science.1181918
6. T. D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura, C. Monroe, and J. L. O'Brien, "Quantum computers", *Nature* **464**, 45-53 (2010). DOI: 10.1038/nature08812